LAWRENCE M. KRAUSS

UN UNIVERSO DE LA NADA

POSTFACIO DE RICHARD DAWKINS



Revolucionario y entretenidísimo ensayo en el que se explica por qué existe un Universo en lugar de Nada y qué papel juega esa Nada en el Universo que conocemos. Según Richard Dawkins este libro es a la física lo que *El origen de las especies* a la biología. En él se explica de forma sencilla y apasionada los complejos mecanismos por los que surgió un Universo a partir de la Nada (con todo lo que eso conlleva) y la importancia de esa Nada (la llamada materia oscura) en el Universo que hoy habitamos. Por su claridad de exposición y su pericia narrativa a Krauss lo han comparado a menudo con Carl Sagan y al igual que él ha colaborado en diversos programas televisivos y online de divulgación científica.



Lawrence M. Krauss

Un universo de la nada

¿Por que hay algo en vez de nada?

ePub r1.5

Titivillus 08.05.2018

edición digital

Título original: *A universe from nothing*
Lawrence M. Krauss, 2012
Traducción: Cecilia Belza & Gonzalo García
Editor digital: Titivillus
Corrección de erratas: Mossad & jcmi & hoshiko
ePub base r1.2
Conversión a pdf: FS, 2018







A Thomas, Patty, Nancy y Robin
que han contribuido a inspirarme
para crear algo de la nada…

En 1897,

nada ocurrió en este lugar

Placa colgada en la pared de la Taberna de Woody Creek,

en Woody Creek, Colorado

PREFACIO

> Sueño o pesadilla, tenemos que vivir nuestra experiencia según es, y tenemos que vivirla despiertos. Vivimos en un mundo atravesado de parte a parte por la ciencia y que es al mismo tiempo completo y real. No podemos convertirlo en un juego por la simple vía de tomar partido.
>
> JACOB BRONOWSKI

Para que todo quede claro desde buen principio, debo admitir que no me siento nada próximo a la convicción —en la que se basan todas las religiones del mundo— de que la creación requiere un creador. Cada día aparecen de pronto objetos hermosos y milagrosos, desde copos de nieve en una fría mañana de invierno a vibrantes arcos iris después de una tormenta veraniega vespertina. Sin embargo, nadie —que no sea un fundamentalista fervoroso— sugerirá que todos y cada uno de estos objetos han sido creados amorosa, esforzada y, ante todo, deliberadamente por una inteligencia divina. De hecho, muchos legos, como muchos científicos, se deleitan en nuestra capacidad de explicar de qué forma —a partir de las simples y elegantes leyes de la física— pueden surgir espontáneamente arcos iris y copos de nieve.

Por descontado, cabe preguntar, como hace en efecto mucha gente: «¿De dónde vienen las leyes de la física?»; o bien, de un modo más sugestivo: «¿Quién creó esas leyes?». Incluso si uno puede responder a la primera duda, es fácil que quien ha formulado la pregunta quiera saber igualmente: «Pero eso, ¿de dónde vino?», o bien: «¿Quién lo creó?», etcétera.

Al final, son muchas las personas reflexivas que acaban llegando a la aparente necesidad de una Causa Primera —como podrían llamarla Platón, Tomás de Aquino o la

moderna Iglesia Católica Romana— y, con ello, a suponer la existencia de algún ser divino: un creador de todo lo que hay y todo lo que alguna vez habrá; alguien o algo eterno y omnipresente.

Sin embargo, afirmar que hubo una Causa Primera aún no resuelve la pregunta: «¿Quién creó al creador?». Al final, ¿cuál es la diferencia entre argumentar a favor de un creador que existe eternamente o defender un universo que, sin tener creador, existe eternamente?

Estos argumentos siempre me recuerdan aquella famosa historia de un experto que ofrece una charla sobre los orígenes del universo (a veces se dice que fue Bertrand Russell, y a veces, William James), y sus palabras son puestas en tela de juicio por una señora que cree que el mundo lo sostiene una tortuga gigante, que a su vez sostiene otra tortuga gigante, y otra más, y siempre otra tortuga más, ¡«hasta el mismo fondo»! Una regresión infinita de alguna fuerza creativa que se engendra a sí misma —aunque sea de una fuerza imaginaria mayor que las tortugas— no nos sitúa para nada más cerca de lo que sea que dio origen al universo. Sin embargo, esta metáfora de una regresión infinita quizá esté, en realidad, más cerca del verdadero proceso por el que surgió el universo que lo que cabe explicar con un único creador. Podría parecer que, si aparcamos la cuestión aduciendo que Dios empezó a «pasar la pelota», obviamos la cuestión de la regresión infinita; pero aquí invocaré mi mantra: el universo es tal y como es, nos guste o no. La existencia o inexistencia de un creador es independiente de nuestros deseos. Un mundo sin Dios o sin propósito puede parecer cruel o absurdo, pero esto, por sí solo, no basta para que Dios exista de verdad.

Igualmente, quizá nuestra mente no alcance a

comprender fácilmente el infinito (aunque las matemáticas, que son producto de nuestra mente, se ocupan de ello con notable acierto), pero esto no significa que los infinitos no existan. Nuestro universo podría ser infinito en su extensión espacial o temporal. O, según dijo en cierta ocasión Richard Feynman, las leyes de la física podrían ser una cebolla de infinitas capas, con nuevas leyes que entrarían en funcionamiento a medida que examináramos nuevas escalas. *Sencillamente, ¡no lo sabemos*!

Durante más de dos mil años, la pregunta «¿Por qué hay algo, en vez de nada?», se ha presentado como un desafío a la afirmación de que nuestro universo —que contiene un vasto complejo de estrellas, galaxias, humanos y quién sabe qué más— podría haber surgido sin responder a un diseño, intención o propósito deliberado. Aunque se la suele plantear como una cuestión filosófica o religiosa, es primero y ante todo una pregunta sobre el mundo natural; por lo tanto, el medio adecuado para intentar resolverla, primero y ante todo, es la ciencia.

El objetivo de este libro es simple. Quiero mostrar cómo la ciencia moderna, de varias formas, puede enfrentarse y *se está* enfrentando a la cuestión de por qué hay algo en vez de nada. Todas las respuestas que se han obtenido —a partir de observaciones experimentales abrumadoramente bellas, así como de las teorías que subyacen a buena parte de la física moderna— sugieren que obtener algo de la nada no supone ningún problema. De hecho, para que el universo llegara a existir se podría haber *requerido* algo a partir de nada. Es más: todos los indicios sugieren que es así como *podría* haber surgido nuestro universo.

Hago hincapié aquí en la palabra *podría*, porque quizá nunca tengamos la suficiente información empírica para

resolver esta cuestión sin ambigüedad. Pero el hecho de que un universo de la nada sea cuando menos plausible tiene una importancia clara, al menos para mí.

Antes de proseguir, quiero dedicar unas pocas palabras al concepto de «nada» (un tema sobre el que volveré, con más extensión, más adelante), pues he aprendido que, cuando debato esta cuestión en foros públicos, nada altera más a los filósofos y teólogos en desacuerdo conmigo que la noción de que, como científico, no comprendo qué es en verdad la «nada». (En estos casos, siento la tentación de replicar que los teólogos son expertos… en nada).

La «nada», insisten, no es ninguna de las cosas de las que yo hablo; la nada es la «inexistencia», en algún sentido vago e impreciso. Esto me recuerda mi propio empeño, en mis primeros debates con creacionistas, de que se definiera el «diseño inteligente», tras lo cual me quedó claro que no hay ninguna definición clara, más allá de decir qué no es. El «diseño inteligente» es, sencillamente, un paraguas unificador que oponer a la evolución. Igualmente, algunos filósofos y muchos teólogos definen y vuelven a definir la «nada» como la negación de cualquiera de las versiones de la nada descritas por los científicos actuales.

Pero en esto, a mi modo de ver, radica la bancarrota intelectual de mucha de la teología y una parte de la filosofía moderna. Pues, sin duda, la «nada» es en todo tan material y física como lo es «algo», sobre todo si se va a definir como la «ausencia de algo». Luego nos corresponde a nosotros comprender con precisión la naturaleza física de estas dos cantidades. Y, sin ciencia, toda definición no es más que palabras.

Hace un siglo, si uno hubiera descrito la «nada» como referida a un espacio puramente vacío, carente de toda

entidad material real, es probable que apenas se lo hubiera discutido nadie. Pero los resultados de la investigación de este último siglo nos han enseñado que el espacio vacío, de hecho, dista de ser la nada inviolada que suponíamos antes de saber más al respecto de cómo funciona la naturaleza. Ahora, los críticos religiosos me dicen que no puedo referirme al vacío como la «nada», sino que debo hablar de un «vacío cuántico», distinto de la «nada» idealizada por los filósofos y teólogos.

Bien, aceptémoslo. Pero ¿y si entonces queremos describir la «nada» como la ausencia de espacio y tiempo en sí? ¿Con esto bastará? De nuevo, sospecho que habría sido bastante… en otro tiempo. Pero, según describiré, hemos aprendido que el espacio y el tiempo pueden aparecer espontáneamente; y por eso, se nos dice que ni siquiera esta «nada» es en verdad la nada que importa. Y se nos dice que, para huir de la nada «real» se necesita la divinidad, y así se define la «nada», por decreto, como «aquello a partir de lo cual solo Dios puede crear algo».

Varias personas con las que he debatido han sugerido asimismo que, si existe un «potencial» de crear algo, entonces ese no es un estado de genuina nada. Y, sin duda, tener leyes de la naturaleza que dan esta posibilidad nos aleja del genuino reino de la inexistencia. Pero entonces, si aduzco que quizá las leyes mismas también surgieron espontáneamente —como tal vez sea el caso, según describiré—, resulta que esto tampoco es bastante válido, porque todo sistema en el que puedan haber surgido las leyes no es la nada genuina.

¿Tortugas hasta el mismo fondo? No lo creo. Pero las tortugas son atractivas porque la ciencia está transformando el campo de juego de formas que hacen sentir incomodidad.

Por descontado, este es uno de los objetivos de la ciencia (o de lo que, en tiempos de Sócrates, habríamos llamado «filosofía natural»). Esta falta de comodidad significa que estamos en el umbral de nuevas perspectivas. Desde luego, invocar a «Dios» para evitar responder a preguntas sobre el «cómo» es pura pereza intelectual. A fin de cuentas, si no hubiera un potencial de creación, entonces Dios no podría haber creado nada. Y sería un abracadabra semántico afirmar que la regresión potencialmente infinita se evita porque Dios existe fuera de la naturaleza y, en consecuencia, el «potencial» de existencia en sí no forma parte de la nada de la cual surgió la existencia.

Mi verdadero propósito aquí es demostrar que, de hecho, la ciencia ha transformado el campo de juego de tal forma que estos debates abstractos e inútiles sobre la naturaleza de la nada han sido sustituidos por intentos operativos útiles de describir cómo podría haberse originado en realidad nuestro universo. También explicaré qué puede implicar esto en relación con nuestro presente y nuestro futuro.

Esto refleja un hecho muy importante. En lo que respecta a nuestra comprensión de cómo evoluciona el universo, la religión y la teología han sido, en el mejor de los casos, irrelevantes. A menudo enturbian las aguas, por ejemplo centrándose en arrojar dudas sobre la nada sin proporcionar ninguna definición del término fundamentada en pruebas empíricas. Pese a que aún no comprendemos del todo el origen de nuestro universo, no hay razón para esperar que las cosas puedan cambiar, a este respecto. Es más: espero que, en última instancia, lo mismo será cierto para nuestra comprensión de áreas que la religión considera ahora como un territorio de su propiedad, tales como la

moralidad humana.

La ciencia ha contribuido eficazmente a ampliar nuestra comprensión de la naturaleza porque el código de valores científico se basa en tres principios clave: (1) sigue las pruebas hasta donde te lleven; (2) si uno tiene una teoría, hay que estar dispuesto a intentar demostrar que es falsa, tanto como a probar que es cierta; (3) el árbitro último de la verdad es el experimento, no la comodidad que nos generen nuestras creencias apriorísticas ni la belleza o elegancia que uno adscribe a los propios modelos teóricos.

Los resultados de los experimentos que describiré aquí no son solo oportunos, sino también inesperados. El tapiz que la ciencia teje al describir la evolución de nuestro universo es mucho más rico y fascinante que todas las imágenes reveladoras o las historias imaginativas que los humanos han inventado. La naturaleza plantea sorpresas que superan con mucho las que puede generar la imaginación humana.

A lo largo de las dos últimas décadas, una emocionante serie de innovaciones en la cosmología, la teoría de partículas y la gravitación han transformado por completo la forma en que vemos el universo, con repercusiones asombrosas y profundas para nuestra comprensión tanto de sus orígenes como de su futuro. En consecuencia, nada podría ser más interesante que escribir sobre la nada, si me permiten el juego de palabras.

La verdadera inspiración de este libro no procede tanto de una voluntad de disipar mitos o atacar creencias como de mi deseo de celebrar el conocimiento y, junto con este, el universo verdaderamente asombroso y fascinante que el nuestro ha resultado ser.

Nuestra búsqueda nos llevará, en una gira relámpago,

hasta los confines de nuestro universo en expansión, desde los primerísimos momentos del Big Bang hasta el futuro remoto, e incluirá el que quizá es el descubrimiento más sorprendente de la física del siglo pasado.

De hecho, el motivo inmediato de escribir este libro en este momento es un descubrimiento profundo sobre el universo que ha impulsado mi propia investigación científica durante la mayor parte de las últimas tres décadas, un hallazgo que nos lleva a la inaudita conclusión de que la mayoría de la energía del universo reside en alguna forma misteriosa, y por el momento inexplicable, que permea todo el espacio vacío. Y no hay exageración en decir que este descubrimiento ha transformado el campo de juego de la cosmología moderna.

Por un lado, este hallazgo ha redundado en pruebas nuevas y destacables en apoyo de la idea de que nuestro universo surgió precisamente de nada. También nos ha hecho sopesar de nuevo toda una serie de suposiciones sobre los procesos que podrían gobernar su evolución y, en última instancia, la cuestión de si las mismas leyes de la naturaleza son verdaderamente fundamentales. Todas estas preguntas, a su vez, tienden a hacer ahora que la cuestión de por qué hay algo en vez de nada resulte menos imponente, si no completamente simplista, como confío en describir.

La génesis directa de este libro se remonta a octubre de 2009, cuando pronuncié una conferencia con el mismo título en Los Ángeles. Para mi sorpresa, el vídeo de la conferencia en YouTube, reproducido en el canal de la Fundación Richard Dawkins, se ha convertido casi en una sensación: en el momento de escribir estas palabras, ha sido visto cerca de un millón de veces, y numerosas copias de algunas partes están siendo utilizadas en sus debates por

comunidades tanto deístas como ateas.

Debido al claro interés que despertaba el tema, y también de resultas de algunos comentarios realizados en internet y en varios medios de comunicación —que se referían a mi conferencia pero inducían a confusión—, entendí que valía la pena recoger en este libro una versión más completa de las ideas expresadas allí. Aquí también puedo aprovechar la ocasión para ampliar los argumentos que ofrecí en su momento. Estos se centraban casi exclusivamente en las revoluciones recientes de la cosmología, que han transformado nuestra concepción del universo en relación con el descubrimiento de la energía y geometría del espacio; expondré esta cuestión en las primeras dos terceras partes de este libro.

En el tiempo intermedio, he podido pensar mucho más sobre los numerosos antecedentes e ideas que conforman mi argumentación; lo he debatido con otros, que reaccionaron con un entusiasmo contagioso; y he explorado con más detalle el impacto de las innovaciones en la física de partículas, y sobre todo, en la cuestión del origen y la naturaleza del universo. Finalmente, he expuesto también algunos de mis argumentos a personas que se oponen a ellos con vehemencia y, en el proceso, he visto más claros algunos puntos que me han ayudado a seguir ampliando mi razonamiento.

Mientras daba cuerpo a las ideas que, como objetivo último, quería describir aquí, me han sido tremendamente útiles las conversaciones con algunos de mis colegas físicos más dados a la reflexión. En particular, quisiera agradecer a Alan Guth y Frank Wilczek que hayan dedicado mucho tiempo a charlar y cruzar correspondencia conmigo, lo que me ha permitido resolver algunas confusiones propias y, en

algunos casos, me ha ayudado a consolidar mis propias interpretaciones.

Animado por el interés que Leslie Meredith y Dominick Anfuso, de Free Press (Simon & Schuster), mostraron por la posibilidad de disponer de un libro sobre este tema, contacté entonces con mi amigo Christopher Hitchens, quien, además de ser una de las personas más cultas y brillantes que conozco, había sido capaz de usar algunos de los argumentos de mi conferencia en su notable serie de debates sobre ciencia y religión. Christopher, a pesar de su mala salud, tuvo la amabilidad, generosidad y valentía de aceptar prologar mi texto. Por este acto de amistad y confianza, le estaré eternamente agradecido. Por desgracia, la enfermedad terminó aplastando a Christopher hasta el punto de que le resultó imposible completar el prefacio, pese a todo su empeño. Aun así, tuve la fortuna adicional de que mi brillante y elocuente amigo, el renombrado científico y escritor Richard Dawkins, ya había aceptado escribir un postfacio. Cuando hube completado mi primer borrador, Richard pasó a componer unas palabras de increíble belleza y claridad, que a la vez son una lección de humildad. Aún estoy sobrecogido. Así pues, quiero dar las gracias a Christopher, a Richard y a todos los que he citado arriba, por su apoyo y su aliento, y por haberme animado a sentarme una vez más ante el ordenador, a escribir este libro.

UN RELATO DE MISTERIO CÓSMICO: EL PRINCIPIO

El Misterio Inicial que aguarda en todo viaje es: para empezar, ¿cómo llegó el viajero a su punto de partida?

LOUISE BOGAN, *Journey Around My Room*

Era una noche oscura y tormentosa…

A comienzos de 1916, Albert Einstein acababa de completar el mayor logro de su vida: un intenso esfuerzo intelectual, de un decenio de duración, por deducir una nueva teoría de la gravedad que él denominó «teoría general de la relatividad». En realidad, no se trataba únicamente de una nueva teoría de la gravedad, sino que era también una teoría nueva sobre el espacio y el tiempo. Y fue la primera teoría científica que pudo explicar no tan solo cómo se mueven los objetos en el universo, sino también cómo podría evolucionar el universo en sí.

Sin embargo, había una pega. Cuando Einstein empezó a aplicar la teoría para describir el universo en su conjunto, constató que no describía el universo en el que parecíamos vivir.

En la actualidad, casi cien años después, resulta difícil apreciar en todo su alcance hasta qué punto nuestra imagen del universo se ha transformado en el transcurso de la vida de una sola persona. En 1917, en lo que respectaba a la comunidad científica, el universo era estático y eterno, y constaba de una única galaxia: nuestra Vía Láctea, rodeada por un vasto espacio vacío, oscuro e infinito. A fin de cuentas, es lo que uno concluiría al levantar la vista hacia el cielo nocturno o mirarlo con un telescopio pequeño; y en aquel tiempo, apenas había razones para sospechar otra

cosa.

En la teoría de Einstein —como en la concepción gravitatoria previa, la de Newton—, la gravedad es una fuerza de pura atracción entre todos los objetos. Esto significa que resulta imposible tener en el espacio un conjunto de masas en reposo perpetuo: su atracción gravitatoria mutua terminará provocando que colapsen hacia el interior, en manifiesta contradicción con la apariencia estática del universo.

El hecho de que la relatividad general de Einstein pareciera incoherente con la concepción coetánea del universo representó para él un golpe mayor de lo que uno podría pensar, por razones que me servirán para desmentir un mito que siempre me ha molestado sobre Einstein y la relatividad general. Es habitual suponer que Einstein trabajó durante muchos años en una sala cerrada, en aislamiento, sin recurrir más que a la pura razón y el pensamiento, hasta que se le ocurrió su hermosa teoría, con independencia de la realidad (¡quizá como sucede en la actualidad con algunas teorías de cuerdas!). Ahora bien, nada podría estar más lejos de la verdad.

Einstein siempre se guio en gran medida por experimentos y observaciones. Aunque realizó numerosos «experimentos mentales» y su empeño le ocupó más de un decenio, en el proceso hubo de aprender matemáticas innovadoras y seguir muchas pistas teóricas falsas antes de poder formular, por fin, una teoría que en efecto poseía belleza matemática. Y aun así, el momento específico más importante, a la hora de consolidar su relación de amor con la relatividad general, tuvo que ver con la observación. Así, durante las últimas semanas de frenética culminación de su teoría —en competencia con el matemático alemán David

Hilbert—, usó sus ecuaciones para calcular la predicción de lo que, de otro modo, podría parecer un resultado astrofísico extraño: una ligera precesión en el perihelio (punto de mayor aproximación) de la órbita de Mercurio en torno al Sol.

Hacía ya tiempo que los astrónomos habían observado que la órbita de Mercurio difería ligeramente de la que predijera Newton. Así, en lugar de trazar una elipse perfecta que vuelva sobre sí misma, la órbita de Mercurio experimenta una precesión (es decir: tras completar una órbita, el planeta no regresa con exactitud al mismo punto, sino que la orientación de la elipse cambia ligeramente a cada paso, de forma que va dibujando un recorrido espiraloide) de una magnitud increíblemente pequeña: 43 segundos de arco (aproximadamente una centésima de grado) por siglo.

En cambio, cuando Einstein calculó la órbita de acuerdo con su teoría de la relatividad general, obtuvo la cifra exacta. Según la valoración de un biógrafo de Einstein, Abraham Pais: «A mi entender, este descubrimiento supuso la experiencia emocional más poderosa —con mucho— de toda la vida científica de Einstein; quizá incluso de toda su vida». Einstein afirmó haber sufrido palpitaciones, como si «algo se hubiera roto» en su interior. Un mes más tarde, cuando, al describir la teoría a un amigo, mencionaba su «belleza incomparable», manifestaba a todas luces el placer que le producía su forma matemática; pero no hubo constancia de palpitaciones.

Sin embargo, esta aparente incoherencia entre la relatividad general y la observación, con respecto a la posibilidad de un universo estático, no duró mucho tiempo. (Aun así, hizo que Einstein introdujera una modificación a

su teoría, que él mismo calificó más tarde como su mayor torpeza. Pero volveremos sobre esto más adelante). Hoy es bien sabido por todos —con la excepción de algunos consejos escolares de Estados Unidos— que el universo no es estático, sino que está expandiéndose; y que esta expansión se inició en un *Big Bang*, una «Gran Explosión» increíblemente caliente y densa que tuvo lugar hace unos 13,72 miles de millones de años. Y lo que es igual de importante: sabemos que nuestra galaxia es solo una más del total de galaxias del universo observable, que quizá ascienda a los 400.000 millones. Somos como los primeros cartógrafos de la Tierra, pues solo ahora estamos empezando a tener mapas que en verdad recojan toda la extensión del universo. Apenas es de extrañar, por lo tanto, que en las décadas recientes nuestra imagen del universo haya experimentado cambios revolucionarios.

El descubrimiento de que el universo no es estático, sino que está en expansión, tiene una profunda significación filosófica y religiosa porque parece indicar que nuestro universo tuvo un principio. Un principio implica creación, y la creación despierta emociones. Aunque la confirmación empírica independiente de la noción de un Big Bang no se produjo hasta varias décadas después de que, en 1929, se descubriera que el universo está en expansión, en 1951 el papa Pío XII todavía la ensalzaba como una demostración del Génesis. En sus palabras:

> Parecería que la ciencia contemporánea, con un salto al pasado, por encima de los siglos, hubiera logrado atestiguar el augusto instante del *Fiat Lux* [«Hágase la luz»] primordial, cuando, junto con la materia, brotó de la nada un mar de luz y radiación, y los elementos se dividieron y revolvieron para

> formar millones de galaxias. Así, con el carácter concreto que caracteriza las pruebas materiales, [la ciencia] ha confirmado la contingencia del universo, así como una deducción bien fundamentada sobre la época en la que el mundo surgió de manos del Creador. Es decir: existió una creación. Y a esto decimos: «Por lo tanto, existe un Creador. Por lo tanto, ¡Dios existe!».

El conjunto de la historia, en realidad, es un poco más interesante. De hecho, la primera persona que propuso un Big Bang fue un sacerdote y físico belga llamado Georges Lemaître. Lemaître poseía una notable combinación de conocimientos. Empezó estudiando ingeniería, fue un artillero condecorado en la primera guerra mundial, y luego se pasó a las matemáticas al mismo tiempo que estudiaba para el sacerdocio, en los primeros años veinte. Después pasó a la cosmología; primero estudió con el famoso astrofísico británico *sir* Arthur Stanley Eddington, luego se trasladó a Harvard y, a la postre, completó un segundo doctorado, en Física, en el MIT.

En 1927, antes de recibir su segundo título de doctor, Lemaître había logrado resolver las ecuaciones de Einstein sobre la relatividad general y demostró que la teoría predice que el universo no es estático y sugiere, de hecho, que vivimos en un universo en expansión. Esta idea se antojaba tan extravagante que el propio Einstein replicó con el siguiente comentario pintoresco: «Emplea usted una matemática correcta, pero su física es abominable».

Sin embargo, Lemaître continuó adelante y, en 1930, propuso una nueva idea: que nuestro universo en expansión, de hecho, comenzó como un punto infinitesimal, que él denominó «átomo primigenio»; y que este principio

representaba —quizá como alusión al Génesis— un «día sin ayer».

Así, el Big Bang que el papa Pío XII ensalzara había sido propuesto en primer lugar por un sacerdote. Cabría haber imaginado que Lemaître sentiría gozo por la validación papal, pero en realidad él ya había reflexionado sobre la idea de que su teoría científica tenía consecuencias teológicas, la había descartado y, al final, eliminó un párrafo del borrador de su artículo de 1931 sobre el Big Bang, donde comentaba esta cuestión.

Lemaître, de hecho, expresó más adelante sus objeciones a la afirmación papal de 1951 según la cual el Big Bang era una prueba del Génesis (en buena medida, porque comprendía que si, con el tiempo, se demostraba que su teoría era incorrecta, ello podría perjudicar la defensa católico-romana del Génesis). En aquellas fechas, había sido elegido miembro de la Academia Pontificia de la Santa Sede, cuya presidencia llegó a ocupar un tiempo más tarde. En sus palabras: «Hasta donde puedo ver, esta clase de teoría es completamente ajena a toda cuestión metafísica o religiosa». El papa nunca volvió a mencionar el tema en público.

De aquí podemos extraer una lección valiosa. Como reconoció Lemaître, que el Big Bang ocurriera de veras o no es una cuestión científica, no teológica. Lo que es más: incluso si el Big Bang ocurrió en efecto —y en la actualidad, todos los datos respaldan esta idea de forma abrumadora—, cada cual podría interpretarlo de formas distintas según fueran sus preferencias metafísicas o religiosas. Así, cabe considerar que el Big Bang sugiere la existencia de un creador, si uno siente tal necesidad; e igualmente, cabe exponer que las matemáticas de la relatividad general

explican la evolución del universo hasta su mismo principio sin la intervención de ninguna deidad. Pero estas conjeturas metafísicas son independientes de la validez física del propio Big Bang y carecen de relevancia a la hora de comprenderlo. Por descontado, a medida que vamos más allá de la mera existencia de un universo en expansión, con miras a comprender los principios físicos que pudieran explicar su origen, la ciencia puede arrojar más luz sobre estas conjeturas; y de hecho, como defenderé más adelante, lo hace.

Sea como fuere, ni Lemaître ni el papa convencieron al mundo científico de que el universo se estaba expandiendo. Como siempre en la buena ciencia, la prueba se obtuvo mediante observaciones cuidadosas, en este caso realizadas por Edwin Hubble. Hubble es de esas personas que no dejan de reforzar mi gran confianza en la humanidad, porque empezó siendo abogado… y luego se dedicó a la astronomía.

Hubble ya había logrado un adelanto notable en 1925, mediante el nuevo telescopio del Monte Wilson, el Hooker de 100 pulgadas. (A efectos de comparación, digamos que ahora estamos construyendo telescopios cuyo diámetro es más de diez veces superior, y la superficie, ¡cien veces más extensa!). Hasta aquel momento, con los telescopios entonces disponibles, los astrónomos podían distinguir imágenes borrosas de objetos que no eran simples estrellas de nuestras galaxias. Las llamaron «nebulosas», a tenor, precisamente, de lo nebuloso de las imágenes. También discutían si tales objetos se hallaban en nuestra galaxia o fuera de ella.

Como en aquella época la concepción imperante del universo decía que nuestra galaxia era todo cuanto existía,

los astrónomos se decantaron, en su mayoría, por el bando de «en nuestra galaxia». Este grupo lo encabezaba el famoso astrónomo Harlow Shapley, de Harvard. Shapley había dejado la escuela en el quinto curso, estudió por su cuenta y, unos años más tarde, fue a Princeton. Decidió estudiar Astronomía porque era el primer tema que encontró en el plan de estudios. En un trabajo de gran influencia, demostró que la Vía Láctea era mucho más extensa de lo que se pensaba, y que el Sol no se hallaba en su centro, sino en un mero rincón remoto y carente de interés. Shapley representaba una fuerza formidable en la astronomía y, por ello, sus ideas sobre la naturaleza de las nebulosas se tenían muy en cuenta.

El día de año nuevo de 1925, Hubble publicó los resultados de sus dos años de estudio de las llamadas «nebulosas espirales». Había logrado identificar en esas nebulosas —incluida la que hoy conocemos como Andrómeda— cierto tipo de estrella variable, denominada «cefeida».

Las estrellas variables cefeidas, observadas por vez primera en 1784, son astros cuya luminosidad varía a lo largo de cierto período regular. En 1908, Henrietta Swan Leavitt, una aspirante a astrónoma, desconocida y, en aquella época, apenas apreciada, halló trabajo como «calculadora» en el Observatorio del Harvard College. (Las «calculadoras» eran mujeres dedicadas a catalogar la luminosidad de las estrellas según las registraban las placas fotográficas del observatorio; por aquel entonces, a las mujeres no se les permitía usar los telescopios del observatorio). Leavitt, que era hija de un pastor congregacionista y descendiente de los Padres Peregrinos, hizo un descubrimiento asombroso, al que aún arrojó nueva

luz en 1912: se dio cuenta de que existía una relación regular entre la luminosidad de las estrellas cefeidas y su período de variación. En consecuencia, si uno podía determinar la distancia a una cefeida aislada de un período conocido (como se logró determinar al año siguiente, en 1913), entonces medir la luminosidad de otras cefeidas del mismo período ¡permitía determinar la distancia a esas otras estrellas!

Como la luminosidad observada de las estrellas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la estrella (la luz se difunde, de forma uniforme, por una esfera cuya área se incrementa al cuadrado de la distancia; por ello, como la luz se difunde sobre una esfera mayor, la intensidad de la luz observada en cualquier punto es inversamente proporcional al área de la esfera), determinar la distancia a estrellas remotas ha sido siempre un gran reto de la astronomía. El descubrimiento de Leavitt revolucionó el campo. (El propio Hubble, que ansió en vano el premio Nobel, afirmó a menudo que el trabajo de Leavitt merecía este galardón; pero era bastante interesado y podría haberlo sugerido por la mera razón de que él mismo, por su obra posterior, habría sido un aspirante natural a compartir el premio con ella). De hecho, la Real Academia sueca había empezado el papeleo necesario para proponer a Leavitt para el Nobel de 1924 cuando recibió la noticia de que había fallecido tres años antes, por un cáncer. Gracias a su fuerte personalidad, su don para la propia promoción y su pericia como observador, Hubble terminó siendo muy conocido; a Leavitt, por desgracia, solo la conocen los aficionados a este campo.

Hubble acertó a emplear su medición de las cefeidas y la relación de Leavitt entre período y luminosidad para

demostrar definitivamente que las cefeidas de Andrómeda (y otras varias nebulosas) estaban demasiado lejos como para hallarse dentro de la Vía Láctea. Se descubrió que Andrómeda era otro universo aislado: otra galaxia espiral, casi idéntica a la nuestra, y una de las más de 100.000 millones de galaxias que, según sabemos ahora, existen en nuestro universo observable. El resultado de Hubble tenía tan poca ambigüedad que la comunidad astronómica —incluido Shapley, quien, dicho sea de paso, por entonces se había convertido en director del observatorio del Harvard College, donde Leavitt había realizado su trabajo pionero— aceptó con rapidez el hecho de que la Vía Láctea no es todo cuanto nos rodea. De pronto, y de un solo salto, ¡la extensión del universo conocido se había multiplicado mucho más que a lo largo de varios siglos! Y también había cambiado su carácter, como casi todo lo demás.

Tras este descubrimiento espectacular, Hubble podría haberse dormido sobre los laureles; pero iba detrás de una pieza mayor o, en este caso, de galaxias mayores. Al medir cefeidas aún más tenues en galaxias aún más distantes, logró trazar un mapa del universo que cubría una escala aún mayor. Ahora bien, en el proceso, descubrió algo aún más llamativo: ¡el universo está en expansión!

Hubble alcanzó este resultado comparando las distancias a las galaxias que él medía con un conjunto de mediciones distinto, de otro astrónomo estadounidense, Vesto Slipher, que había medido los espectros de luz que procedían de esas galaxias. Para explicar la existencia y naturaleza de tales espectros, necesito volver al comienzo mismo de la astronomía moderna.

Uno de los descubrimientos más importantes de la astronomía fue que las estrellas y la Tierra, en gran medida,

constan de la misma materia. Todo empezó —como tantas cuestiones de la ciencia moderna— con Isaac Newton. En 1665, Newton, a la sazón un joven científico, hizo pasar un rayo de sol —obtenido al dejar a oscuras la habitación, salvo por un pequeño agujero realizado en el postigo de la ventana— a través de un prisma y, de esta forma, vio que el rayo de sol se dispersaba dando origen a los consabidos colores del arco iris. Concluyó que la luz blanca del sol contenía todos estos colores, y estaba en lo cierto.

Ciento cincuenta años después, otro científico examinó con más cuidado la luz así dispersada y descubrió bandas oscuras entre los colores; coligió que se debían a la existencia de materiales en la atmósfera exterior del Sol, que estaban absorbiendo luz de ciertos colores (o longitudes de onda) específicos. Estas «líneas de absorción», como se les dio en llamar, pudieron identificarse con longitudes de onda luminosas que, según se comprobó, eran absorbidas por materiales conocidos en la Tierra, como por ejemplo hidrógeno, oxígeno, hierro, sodio y calcio.

En 1868, otro científico observó dos nuevas líneas de absorción en la zona amarilla del espectro solar, que no se correspondían con ningún elemento conocido en la Tierra. Decidió que debían corresponderse con algún elemento nuevo, que denominó helio. Una generación más tarde, se descubrió helio en la Tierra.

Examinar el espectro de radiación que procede de otras estrellas es una técnica científica relevante para comprender la composición, temperatura y evolución de tales estrellas. A partir de 1912, Slipher examinó los espectros luminosos procedentes de varias nebulosas espirales y halló que eran similares a los de estrellas cercanas, salvo por el hecho de que todas las líneas de absorción se desplazaban en una

misma cantidad de longitud de onda.

En aquel momento, se entendió que el fenómeno se debía al conocido «efecto Doppler», así llamado por el físico austríaco Christian Doppler, que en 1842 había explicado que las ondas que recibimos desde una fuente en movimiento se alargarán si la fuente se aleja de uno y se comprimirán si se acerca. Es una manifestación de un fenómeno del que todos tenemos constancia, y que a mí suele recordarme una tira cómica de Sidney Harris, en la que dos vaqueros a caballo contemplan un tren que corre a lo lejos, por la llanura, y uno le dice al otro: «¡Me encanta oír el solitario lamento del pitido del tren a medida que la magnitud de la frecuencia cambia debido al efecto Doppler!». En efecto, un pitido de tren, o una sirena de ambulancia, suenan más altos si el tren o la ambulancia se acerca a uno, y más bajos, si se aleja.

Resulta que el mismo fenómeno que afecta a las ondas sonoras afecta a las luminosas, aunque sea por razones ligeramente distintas. Las ondas de luz emitidas por una fuente que se aleja de uno, ya sea debido a su movimiento local en el espacio o bien debido a la intervención de la expansión del espacio, se alargarán y, en consecuencia, aparecerán más rojas de lo que se verían en otro caso, porque el rojo es el extremo más largo de la longitud de onda del espectro visible; las ondas procedentes de una fuente que se mueve hacia ti, por el contrario, se comprimirán y se verán más azules.

En 1912, Slipher observó que las líneas de absorción de la luz que procedía de todas las nebulosas espirales se habían desplazado sistemáticamente, casi todas, hacia longitudes de onda más largas (aunque en algunos casos, como Andrómeda, el cambio suponía longitudes de onda

más cortas). De ello concluyó, acertadamente, que la mayoría de esos objetos se estaba alejando de nosotros y lo hacía a velocidades considerables.

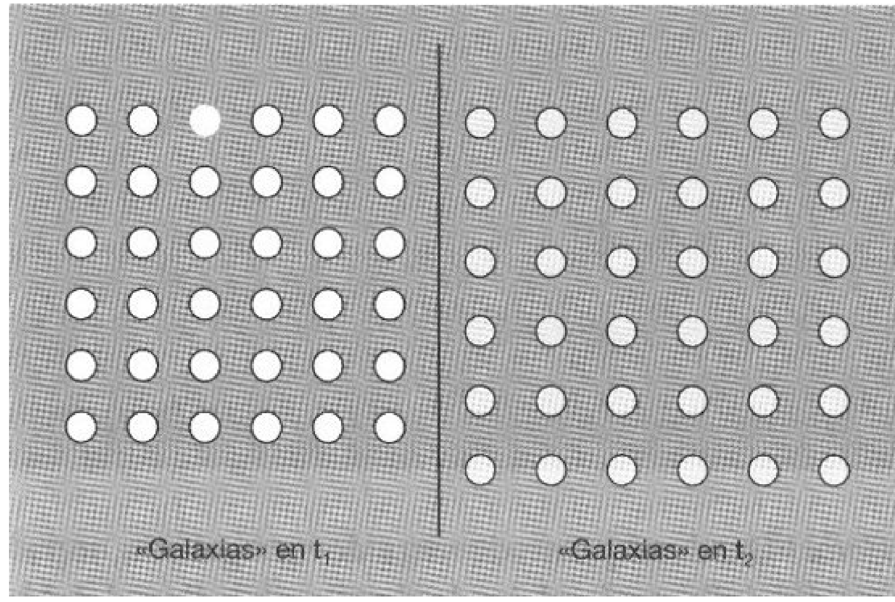
Hubble pudo comparar sus propias observaciones sobre la distancia de estas galaxias espirales (en ese momento, ya se sabía que eran tales) con las mediciones de Slipher, relativas a las velocidades a las que se alejaban. En 1929, con la ayuda de Milton Humason (un empleado del Monte Wilson cuyo talento técnico era tan notable que había conseguido un trabajo en el observatorio sin haber completado siquiera los estudios de secundaria), anunció el descubrimiento de una relación empírica llamativa, que hoy se conoce como «ley de Hubble»: existe una relación proporcional entre la velocidad de recesión y la distancia a una galaxia. Es decir, las galaxias que están más lejos de nosotros ¡se alejan de nosotros a velocidades aún más rápidas!

Cuando a uno le cuentan por vez primera este hecho notable —que casi todas las galaxias se están alejando de nosotros, y que las que se hallan el doble de lejos se alejan el doble de rápido, el triple de lejos el triple de rápido, etc… hay una conclusión que parece obvia: *¡nos hallamos en el centro del universo*!

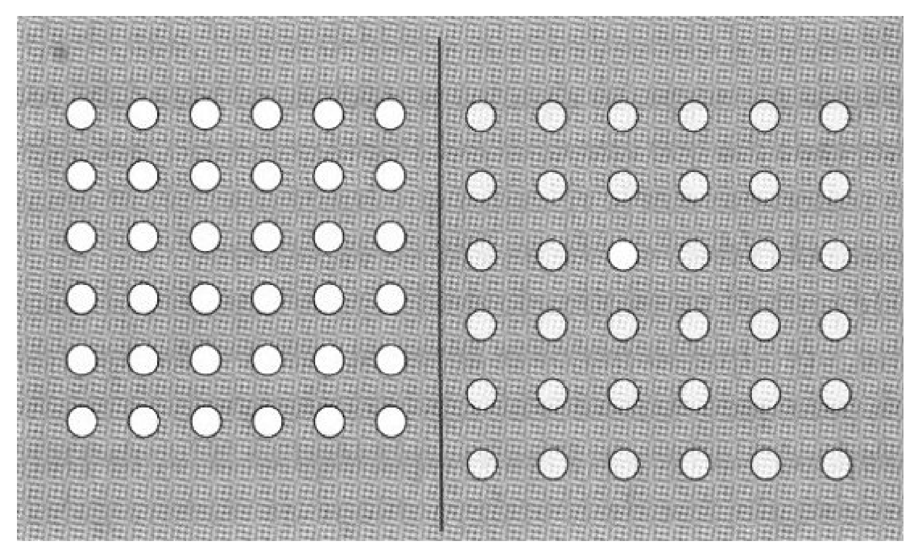
Según me sugieren algunos amigos, a mí hace falta recordarme cada día que *esto no es así*. Por el contrario, era algo del todo coherente con la relación que había predicho Lemaître. Nuestro universo, en efecto, está en expansión.

He probado a explicarlo de distintas maneras y, sinceramente, creo que lo mejor es intentar mirar el bosque desde fuera, para que los árboles no nos lo oculten; más en concreto, el bosque del universo. Para ver qué implica la ley de Hubble, es preciso alejarse de la atalaya miope de

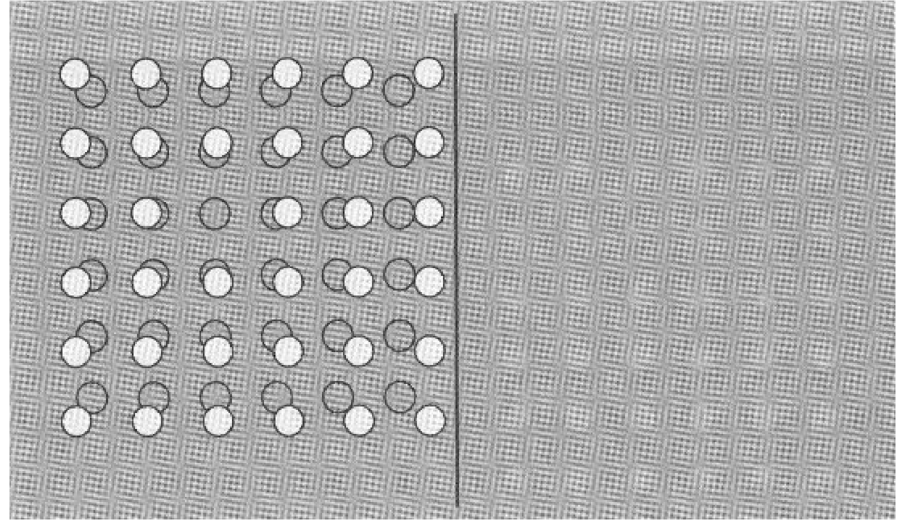
nuestra galaxia y contemplar el universo desde el exterior. Aunque es difícil situarse fuera de un universo tridimensional, resulta fácil distanciarse de uno bidimensional. En las dos figuras siguientes, he dibujado ese universo en expansión en dos momentos distintos. Como se puede ver, en el segundo caso, las galaxias están más distantes entre sí.



Ahora imaginemos que vivimos en una de las galaxias del segundo tiempo, t_2, que marcaré en blanco, en el tiempo t_2.



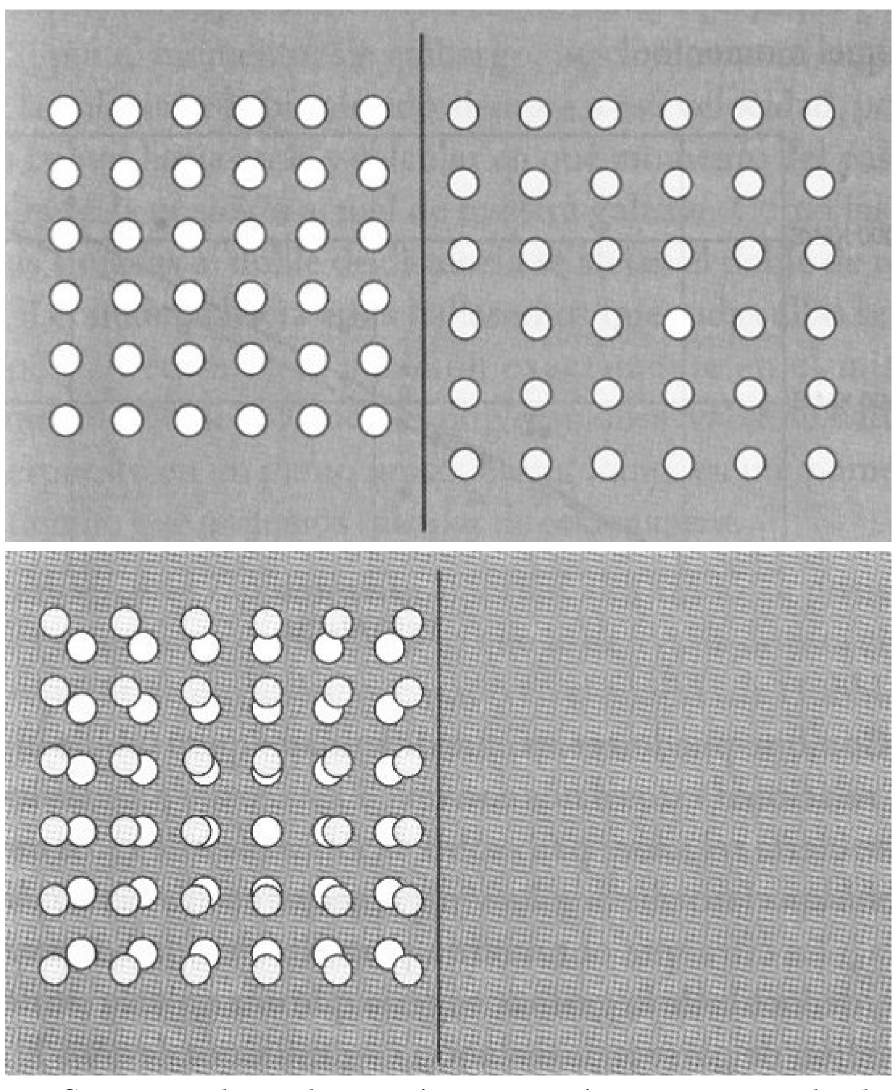
Para ver qué aspecto tendría la evolución del universo desde el punto de vista de esta galaxia, simplemente sitúo la imagen de la derecha sobre la de la izquierda, con la galaxia marcada en blanco situada sobre sí misma.



Voilá! Desde el punto de vista de esta galaxia, todas las demás galaxias se están alejando; las que se hallan al doble de distancia han recorrido el doble de distancia en el mismo tiempo, las que distan el triple han recorrido el triple de distancia etc. En tanto no perciban un límite, los que se

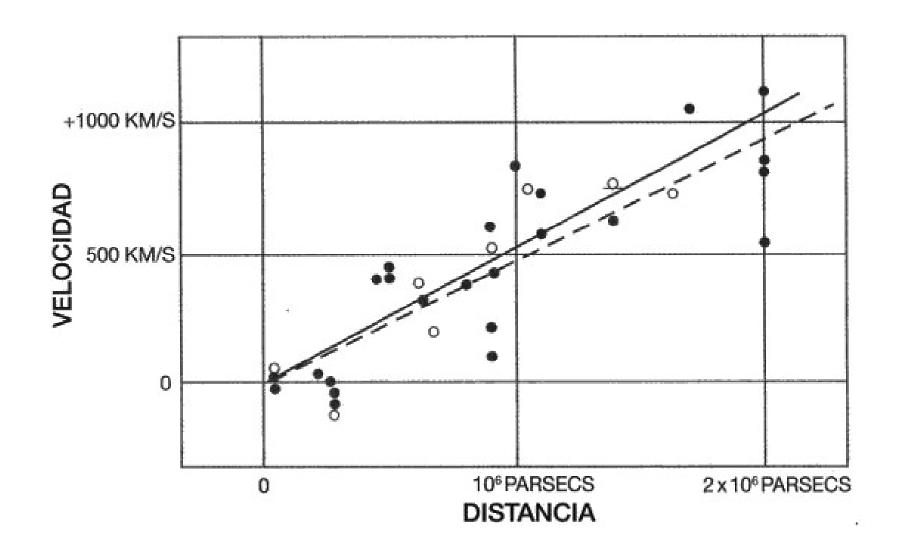
encuentran en la galaxia sienten que están en el centro de la expansión.

No importa qué galaxia elijamos. Escojamos otra galaxia, repitamos el ejercicio:



Según cuál sea la propia perspectiva, pues, o *todos los lugares* son el centro del universo o *ninguno* lo es. En realidad, no importa: la ley de Hubble es coherente con un universo en expansión.

Ahora bien, cuando Hubble y Humason dieron a conocer su análisis por vez primera, en 1929, no solo informaron de una relación lineal entre la distancia y la velocidad de recesión, sino que además calcularon cuál podría ser la velocidad de la propia expansión. Estos son los datos que se ofrecieron en aquel momento:



Como se puede ver, no fue desatinado que Hubble intentara relacionar estos datos con una línea recta. (A todas luces, existe cierta relación; pero sobre la única base de estos datos, no está tan claro que la solución que mejor encaja sea una línea recta). La cifra que obtuvieron para la velocidad de expansión, deducida de la gráfica, sugería que una galaxia situada a un millón de parsecs de distancia —3 millones de años luz, la separación media entre galaxias— se aleja de nosotros a una velocidad de 500 kilómetros por segundo. Este cálculo ya no fue tan afortunado, sin embargo.

La razón es relativamente fácil de comprender. Si hoy todas las cosas se alejan unas de otras, en tiempos pretéritos

tenían que estar más próximas entre sí. Pues bien, si la gravedad es una fuerza de atracción, debería estar ralentizando la expansión del universo. Esto supone que la galaxia que hoy vemos alejarse de nosotros a 500 kilómetros por segundo, anteriormente se habría estado alejando con mayor rapidez.

Si por el momento, sin embargo, nos limitamos a suponer que la galaxia se había alejado siempre a esa velocidad, podemos contar hacia atrás y calcular en qué momento del pasado estaba en la posición actual de nuestra galaxia. Como las galaxias situadas al doble de distancia se alejan el doble de rápido, si contamos hacia atrás hallaremos que todas ellas se superponían en nuestra posición exactamente en el mismo momento. De hecho, todo el universo observable se hallaría superpuesto en un punto único, el Big Bang, en un momento del tiempo que podemos calcular de esta manera.

Esta estimación, a todas luces, marca un límite máximo para la edad del universo, porque si, tiempo atrás, las galaxias se movían más rápidamente, habrían alcanzado su posición actual en un tiempo menor de lo que se derivaría de esta cifra.

A partir de este cálculo, basado en el análisis de Hubble, el Big Bang ocurrió hace aproximadamente 1.500 millones de años. En 1929, no obstante, ya se conocían pruebas claras (salvo entre algunos literalistas de las Escrituras en Tennessee, Ohio, y unos pocos estados más) de que la Tierra existía desde hacía más de 3.000 millones de años.

Bien, para un científico es ciertamente incómodo concluir que la Tierra es más antigua que el universo. Y, lo que es más importante: nos dice que hay algo mal en ese análisis.

La fuente de esta confusión era, sencillamente, el hecho de que los cálculos de las distancias con los que trabajaba Hubble, derivados de las relaciones de las cefeidas en nuestra galaxia, eran incorrectos por sistema. La escala de distancias que se basaba en utilizar las cefeidas próximas para calcular la distancia de las cefeidas más alejadas, y luego calcular la distancia hasta galaxias en las que se observaban cefeidas aún más distantes, era deficiente.

La historia de cómo se han superado estos efectos sistemáticos es demasiado larga y compleja para describirla aquí y, en todo caso, ha perdido su importancia porque ahora contamos con un calculador de distancias mucho mejor.

Abajo reproduzco una de mis fotografías favoritas del Telescopio Espacial Hubble:



Muestra una hermosa galaxia espiral, situada muy, muy lejos y en un tiempo muy, muy anterior (muy, muy anterior porque, para llegar hasta nosotros, la luz de la galaxia necesita más de 50 millones de años). Una galaxia espiral como esta, que se asemeja a la nuestra, contiene cerca de 100.000 millones de estrellas. En el núcleo brillante de su centro habrá quizá unos 10.000 millones de estrellas. Fijémonos en la estrella situada en la esquina inferior izquierda, cuyo brillo es casi igual al de esos 10.000 millones de estrellas. La primera vez que la vemos, podemos suponer razonablemente que se trata de una estrella que, situada mucho más cerca de nuestra galaxia, se ha colado en la fotografía. Pero en realidad es una estrella de esa misma galaxia remota, que dista de nosotros más de 50 millones de años luz.

Desde luego, no es una estrella corriente. Es una estrella que acaba de explotar, una supernova, una de las exhibiciones de fuegos artificiales más brillantes del universo. Cuando una estrella explota, durante un breve período de tiempo (un mes, aproximadamente) brilla con una luz visible que equivale al brillo de 10.000 millones de estrellas.

Por fortuna para nosotros, las estrellas no explotan muy a menudo sino, más o menos, una vez cada cien años en cada galaxia. Pero es una suerte que exploten, porque si no lo hicieran, no estaríamos aquí. Uno de los hechos más poéticos de los que tengo constancia, al respecto del universo, es que, en lo esencial, todos los átomos de nuestro cuerpo estuvieron antes en una estrella que explotó. Más aún: los átomos de su mano izquierda y su mano derecha, probablemente, procedían de estrellas distintas. Todos somos, literalmente, hijos de las estrellas; nuestros cuerpos están hechos de polvo de estrellas.

¿Cómo lo sabemos? Bien, podemos extrapolar nuestra imagen del Big Bang hasta un tiempo en el que el universo tenía alrededor de 1 segundo de vida; y calculamos que toda la materia observada estaba comprimida en un plasma denso cuya temperatura debió de ser de unos 10.000 millones de grados (en la escala de Kelvin). A esta temperatura, es fácil que se puedan desarrollar reacciones nucleares entre protones y neutrones, que se unen y luego separan en nuevas colisiones. Si seguimos este proceso mientras el universo se va enfriando, podemos predecir con qué frecuencia estos constituyentes nucleares primigenios se unirán para formar los núcleos de átomos más pesados que el hidrógeno (es decir, helio, litio…).

Al hacerlo así, hallamos que, en lo esencial, ningún

núcleo —fuera del litio, el tercer núcleo más ligero de la naturaleza— se formó durante la bola de fuego primordial que fue el Big Bang. Tenemos la certeza de que son cálculos correctos porque nuestras predicciones sobre la abundancia cósmica de los elementos más ligeros coinciden, punto por punto, con estas observaciones. La abundancia de estos elementos más ligeros —hidrógeno, deuterio (el núcleo del hidrógeno pesado), helio y litio— varía en 10 órdenes de magnitud (a grandes rasgos, el 25% de los protones y neutrones, por masa, terminan formando helio, mientras solo uno de cada 10.000 millones de neutrones y protones termina dentro de un núcleo de litio). En todo este espectro tan increíble, la observación y las predicciones teóricas coinciden.

Esta es una de las predicciones más famosas, significativas y acertadas que nos indican que el Big Bang ocurrió de verdad. Solo una «gran explosión» caliente puede producir la abundancia observada de los elementos ligeros y ser coherente con la expansión del universo que se observa en la actualidad. En mi bolsillo trasero llevo una tarjeta que muestra la comparación de las predicciones de la abundancia de elementos ligeros y la abundancia constatada, de forma que, cada vez que me encuentro con alguien que no da crédito al Big Bang, se la puedo mostrar. Por lo general, no llego tan lejos en la conversación, dado que, claro está, los datos casi nunca impresionan a aquellos que ya han decidido de antemano que un panorama es erróneo. Como sea, llevo conmigo esa tarjeta y la reproduciré unas páginas más adelante.

Aunque el litio es fundamental para algunas personas, para la mayoría resultan mucho más importantes todos los núcleos pesados, como el carbón, el nitrógeno, el oxígeno, el

hierro y demás. Estos no se formaron durante el Big Bang. El único lugar donde pueden formarse es el abrasador núcleo de las estrellas. Y el único modo en el que podrían haber pasado al cuerpo de un lector contemporáneo es que esas estrellas tuvieran la gentileza de explotar y diseminar sus productos por el cosmos, de forma que estos pudieran, algún día, fusionarse en y en torno de un pequeño planeta azul situado cerca de la estrella que conocemos como el Sol. En el transcurso de la historia de nuestra galaxia, han explotado unos 200 millones de estrellas. Es una miríada de estrellas que, por así decir, se han sacrificado para que un día pudiéramos nacer. Bien cabría calificarlas, con tanto mérito como el que más, de nuestras Salvadoras.

Resulta que, según han demostrado estudios realizados minuciosamente durante la década de 1990, cierto tipo de estrella en explosión, denominada «supernova de tipo Ia», posee una propiedad notable: con gran precisión, las supernovas de tipo Ia cuyo brillo intrínseco es mayor también brillan por más tiempo. La correlación, aunque teóricamente aún no se comprende del todo, es muy firme desde el punto de vista empírico. En consecuencia, tales supernovas son excelentes «candelas estándar». Esto quiere decir que se puede utilizar esas supernovas para calibrar distancias porque cabe determinar directamente su brillo intrínseco por una medición que es independiente de su distancia. Si observamos una supernova en una galaxia distante —y es en efecto posible, porque son muy brillantes —, podemos inferir su brillo intrínseco a partir de observar cuánto tiempo brilla. Entonces, al medir el «desplazamiento al rojo» de la luz de las estrellas de esa galaxia, podemos determinar su velocidad y, de este modo, comparar la velocidad con la distancia e inferir la tasa de expansión del universo.

Hasta aquí, perfecto, pero si las supernovas solo explotan como una vez cada cien años por galaxia, ¿qué probabilidad tenemos de poder ver alguna? A fin de cuentas, ¡la última supernova de nuestra propia galaxia que se pudo observar desde la Tierra la vio Johannes Kepler en 1604! De hecho, se dice que en nuestra galaxia solo se observan supernovas durante la vida de los astrónomos verdaderamente grandes… y Kepler, ciertamente, satisface este requisito.

Kepler, que empezó como humilde profesor de matemáticas en Austria, pasó a ser ayudante del astrónomo Tycho Brahe (que a su vez había observado en nuestra galaxia una supernova anterior y, a cambio, recibió del rey de Dinamarca toda una isla) y usó los datos que, durante más de una decada, Brahe había ido reuniendo sobre las posiciones de los planetas en el cielo para derivar, a principios del siglo XVII, sus famosas tres leyes del movimiento planetario:

1. Los planetas se mueven alrededor del Sol en órbitas elípticas.
2. Una línea que conecte un planeta con el Sol barrerá áreas iguales durante intervalos de tiempo iguales.
3. El cuadrado del período orbital de un planeta es directamente proporcional al cubo (tercera potencia) del eje semimayor de su órbita (o, en otras palabras, del «eje semimayor» de la elipse, la mitad de la distancia del eje que cruza la parte más ancha de la elipse).

Estas leyes, a su vez, sientan las bases para que Newton, casi un siglo después, derive la ley de la gravedad universal. Además de esta notable contribución, Kepler defendió con

éxito a su madre en un juicio por brujería y escribió la que quizá fuera la primera historia de ficción científica sobre un viaje a la Luna.

En la actualidad, una forma sencilla de ver una supernova consiste en asignar una galaxia del cielo a cada uno de los diversos estudiantes de un doctorado. A fin de cuentas, un centenar de años no es demasiado distinto —en un sentido cósmico, al menos— al tiempo que se promedia en concluir una tesis doctoral y, por otro lado, los estudiantes de doctorado son abundantes y baratos. Por fortuna, sin embargo, no es necesario recurrir a medidas tan extremas, por una razón muy sencilla: el universo es grande y viejo y, en consecuencia, ocurren sin cesar acontecimientos raros. Salga usted una noche cualquiera al bosque o al desierto, donde se puedan ver estrellas, y levante la mano para dibujar un círculo entre su pulgar y su índice; un círculo diminuto, del tamaño de un céntimo. Diríjalo hacia un punto oscuro del cielo, donde no haya estrellas visibles. En ese punto oscuro, con un telescopio lo bastante grande —como los que podemos usar hoy en día—, se distinguirían quizá 100.000 galaxias, cada una de las cuales contiene miles de millones de estrellas. Como las supernovas explotan una vez cada cien años, con 100.000 galaxias a la vista, uno puede confiar en que verá explotar, de media, unas tres estrellas por noche.

Los astrónomos lo hacen exactamente así. Solicitan tiempo en el telescopio y, algunas noches, verán la explosión de una estrella, otras, de dos, y alguna noche quizá las nubes les impidan ver nada. De este modo, varios grupos han podido determinar la constante de Hubble con una incertidumbre inferior al 10%. La nueva cifra —unos 70 kilómetros por segundo para galaxias situadas a un

promedio de 3 millones de años luz de distancia— es casi diez veces menor que la calculada por Hubble y Humason. En consecuencia, creemos que la edad del universo se aproxima a los 13.000 millones de años, no a los 1.500 millones.

Según describiré más adelante, esto también encaja a la perfección con cálculos independientes de la edad de las estrellas más antiguas de nuestra galaxia. De Brahe a Kepler, de Lemaître a Einstein y Hubble, y del espectro estelar a la abundancia de elementos ligeros, cuatrocientos años de ciencia moderna nos han legado un retrato extraordinario y coherente del universo en expansión. Todo tiene lógica. La teoría del Big Bang goza de buena salud.

UN RELATO DE MISTERIO CÓSMICO: PESAR EL UNIVERSO

> Hay saberes sabidos: son cosas que sabemos que sabemos.
>
> Hay ignorancias sabidas. Vale decir, cosas que sabemos que ignoramos.
>
> Pero también hay ignorancias ignoradas: son cosas que ignoramos que ignoramos.
>
> DONALD RUMSFELD

Tras haber establecido que el universo tuvo un principio y que ese principio fue un tiempo finito y mensurable del pasado, una pregunta que cabe hacerse naturalmente a continuación es: «¿Cómo terminará?».

De hecho, esta es precisamente la pregunta que me hizo pasar de mi territorio nativo, la física de partículas, a la cosmología. Durante los años setenta y ochenta, fue quedando cada vez más claro —a partir de mediciones detalladas del movimiento de las estrellas y el gas en nuestra galaxia, así como del movimiento de las galaxias en las grandes agrupaciones de galaxias que se conoce como «cúmulos»— que en el universo había mucho más que lo que se veía a simple vista (o con el telescopio). La gravedad es la principal de las fuerzas que intervienen en la descomunal escala de las galaxias, por lo que medir el movimiento de objetos a esas escalas nos permite investigar la atracción gravitacional que impulsa ese movimiento. Tales mediciones empezaron a florecer con la labor pionera de la astrónoma estadounidense Vera Rubin, y sus colegas, en los primeros años setenta. Rubin se había doctorado en Georgetown tras recibir clases nocturnas mientras su marido la esperaba en el coche, porque ella no sabía conducir. Había solicitado entrar en la universidad de Princeton, pero

este centro no aceptó a mujeres en el programa de graduación en Astronomía hasta 1975. Rubin llegó a ser la segunda mujer —solo la segunda— a la que se concedió la Medalla de Oro de la Real Sociedad Astronómica. Ese premio, como sus otros honores —numerosos y bien merecidos—, procedían de sus revolucionarias mediciones de la velocidad de rotación de nuestra galaxia. Tras observar estrellas y gas caliente que estaban cada vez más lejos del centro de nuestra galaxia, Rubin determinó que estas regiones se estaban moviendo a una velocidad muy superior a la que les correspondería si la fuerza gravitacional que impulsaba su movimiento respondiera a la masa de todos los objetos observados dentro de la galaxia. Gracias al trabajo de Rubin, con el tiempo, los cosmólogos comprendieron que la única forma de explicar este movimiento era postular que en nuestra galaxia existía mucha más masa que la que resultaba del simple hecho de sumar la masa de todas esas estrellas y ese gas caliente.

Había un problema, sin embargo, con esta concepción. Los mismísimos cálculos que, de un modo tan hermoso, explican qué abundancia de los elementos ligeros (hidrógeno, helio y litio) observamos en el universo también nos dice, más o menos, cuántos protones o neutrones —la sustancia de la materia normal— deben existir en el universo. Esto se debe a que, como en cualquier receta de cocina —en este caso, de cocina nuclear—, la cantidad de producto final que se obtenga depende de qué cantidad de cada ingrediente se haya usado de partida. Si uno dobla la receta (cuatro huevos en vez de dos, por ejemplo), obtiene más producto final (en este caso, más tortilla). Sin embargo, la densidad inicial de los protones y neutrones, en el universo surgido del Big Bang, según la determina el ajustarse a la abundancia observada de hidrógeno, helio y

litio, da cuenta de aproximadamente el doble del material que podemos ver en las estrellas y el gas caliente. ¿Dónde están esas partículas?

Es fácil imaginar formas de esconder protones y neutrones (bolas de nieve, planetas, cosmólogos… aunque ninguno de ellos brilla), por lo que muchos físicos predijeron que hay tantos protones y neutrones contenidos en objetos oscuros como en los objetos visibles. Sin embargo, cuando sumamos cuánta «materia oscura» debe existir para explicar el movimiento material en nuestra galaxia, hallamos que la relación entre la materia total y la visible no es de 2 a 1, sino que se aproxima más a una relación de 10 a 1. Si esto no es un error, entonces la materia oscura no puede estar hecha de protones y neutrones, por la mera razón de que no los hay en cantidad suficiente.

Como joven físico especializado en las partículas elementales a principios de los años ochenta, tener noticia de la posible existencia de esta materia oscura exótica me resultaba de lo más emocionante. Implicaba, literalmente, que las partículas que predominaban en el universo no eran los buenos, anticuados y trillados neutrones y protones, sino, posiblemente, alguna nueva clase de partícula elemental; algo que en la actualidad no existía en la Tierra, sino algo misterioso que fluía de una estrella a otra y entre ellas y recorría en silencio todo el espectáculo gravitacional que denominamos galaxia. Aún más emocionante, al menos para mí, era que esto implicaba tres nuevas líneas de investigación que podían arrojar una luz fundamentalmente nueva sobre la naturaleza de la realidad:

1. Si estas partículas se crearon en el Big Bang, como los elementos ligeros que he descrito, entonces deberíamos

ser capaces de usar ideas sobre las fuerzas que gobiernan las interacciones de partículas elementales (en lugar de las interacciones de núcleos relevantes para determinar la abundancia elemental) para calcular la abundancia de posibles nuevas partículas exóticas en el universo actual.

2. Tal vez sería posible derivar la abundancia total de materia oscura en el universo sobre la base de ideas teóricas en la física de partículas, o tal vez sería posible proponer nuevos experimentos para detectar la materia oscura; en uno y otro caso, nos indicaría cuánta materia existe en total y, en consecuencia, cuál es la geometría de nuestro universo. La tarea de la física no es inventar cosas que no podemos ver para explicar las cosas que podemos ver, sino comprender cómo se puede ver lo que no podemos ver; ver lo que antes era invisible, las «ignorancias sabidas». Cada nueva partícula elemental candidata a la materia oscura sugiere nuevas posibilidades de experimentos con los que detectar directamente las partículas de materia oscura que desfilan por la galaxia, al construir dispositivos en la Tierra que las detecten cuando nuestro planeta intercepta su movimiento en el espacio. En lugar de utilizar telescopios para buscar objetos remotos, si las partículas de materia oscura se hallan en grupos difusos que permean toda la galaxia, entonces están aquí y ahora, con nosotros, y unos detectores terrestres quizá podrían revelar su presencia.

3. Si pudiéramos determinar cuál es la naturaleza de la

materia oscura, así como su abundancia, quizá podríamos determinar cómo terminará el universo.

Esta última posibilidad me pareció la más emocionante, así que empezaré con ella. En realidad, me interesé por la cosmología porque quería ser el primero en saber cómo terminaría el universo.

En aquel momento, parecía una buena idea.

Cuando Einstein desarrolló su teoría de la relatividad general, el centro de la teoría albergaba la posibilidad de que el espacio se pudiera curvar en presencia de materia o energía. Esta idea teórica dejó de ser una mera conjetura en 1919, cuando dos expediciones observaron luz estelar que se curvaba en torno del Sol durante un eclipse solar, y lo hacía precisamente en el grado en que Einstein había predicho que pasaría si la presencia del Sol curvaba el espacio en torno de sí. Aquel mismo instante, Einstein saltó a la fama. (Hoy se tiende a creer que Einstein se hizo famoso gracias a la ecuación $E = mc^2$, que formuló quince años antes; pero no fue así).

Bien, si el espacio es potencialmente curvo, la geometría del universo entero, de golpe, adquiere mucho más interés. Según cuál sea la cantidad total de materia en nuestro universo, podría existir en tres tipos distintos de geometrías, denominadas *abierta, cerrada* o *plana.*

Es difícil imaginar qué aspecto podría tener en realidad un espacio curvado tridimensional. Dado que somos seres tridimensionales, intuitivamente no nos resulta más fácil concebir cómo sería un espacio tridimensional curvado que, para los seres bidimensionales del famoso libro *Planilandia*, imaginar qué aspecto tendría su mundo para un observador tridimensional, si aquel estuviera curvado como la superficie

de una esfera.[1] Además, si la curvatura es muy escasa, resulta difícil imaginar cómo se la podría detectar de hecho en la vida cotidiana, igual que, al menos en la Edad Media, eran muchas las personas que entendían que la Tierra debía ser plana porque, desde su perspectiva, así lo parecía.

Es difícil imaginar universos tridimensionales curvados —un universo cerrado es como una esfera tridimensional, lo que desde luego suena impresionante—, pero algunos aspectos son fáciles de describir. Así, si uno mirara lo bastante lejos en una dirección, en un universo cerrado, acabaría viendo su propia cabeza por la parte de atrás.

Aunque hablar sobre estas geometrías exóticas pueda parecer divertido o imponente, operativamente su existencia tiene una consecuencia de mucho mayor calado. La relatividad general nos dice, inequívocamente, que un universo cerrado cuya densidad de energía está dominada por materia como las estrellas y galaxias —e incluso materia oscura, más exótica—, en algún momento *tiene que* colapsar de nuevo en un proceso que recuerda a un Big Bang a la inversa: una Gran Implosión (*Big Crunch*), por así decir. Un universo abierto continuará expandiéndose para siempre a una velocidad finita; y un universo plano está justo en el límite: se ralentiza sin llegar a detenerse del todo.

Por lo tanto, determinar la cantidad de materia oscura y, con ello, la densidad total de la masa del universo, prometía revelar la respuesta a la antiquísima pregunta (digámoslo con los versos quizá no tan antiquísimos de T. S. Eliot): ¿terminará el universo «con una explosión» o «con un gemido»? Determinar la abundancia total de la materia oscura ha dado lugar a toda una saga que se remonta, al menos, a medio siglo atrás, y se podría escribir todo un libro al respecto; en realidad, yo mismo lo hice, en *La quinta*

esencia.[2] Sin embargo, en este caso, como demostraré ahora (primero con palabras y solo luego con una imagen), es cierto que una imagen bien puede valer mil palabras (y quizá cien mil).

En el universo, los objetos de mayor tamaño unidos por fuerzas gravitacionales se llaman supercúmulos de galaxias. Pueden contener miles de galaxias individuales (o más) y extenderse a lo largo de decenas de millones de años luz. La mayor parte de las galaxias existe en tales supercúmulos; nuestra propia galaxia se halla dentro del supercúmulo Virgo, cuyo centro dista casi 60 millones de años luz de nosotros.

Como los supercúmulos son tan grandes y masivos, prácticamente todo lo que caiga en algún lugar caerá en un cúmulo. Así pues, si pudiéramos pesar supercúmulos de galaxias y luego calcular la densidad total de tales supercúmulos en el universo, lograríamos «pesar el universo», incluida toda la materia oscura. Luego, usando las ecuaciones de la relatividad general, podríamos determinar si hay materia bastante para cerrar el universo o no.

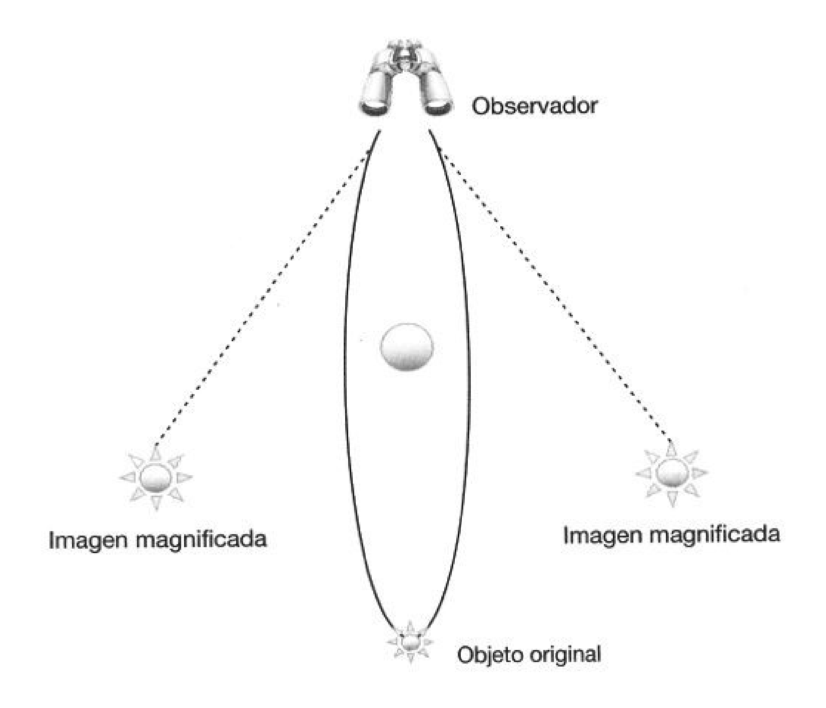
Hasta aquí, estupendo, pero ¿cómo se pueden pesar objetos que ocupan decenas de millones de años luz? Es simple: mediante la gravedad.

En 1936, Albert Einstein, a instancias de un astrónomo aficionado, Rudi Mandl, publicó un breve artículo en la revista *Science*, titulado «Acción de lente de una estrella por la desviación de la luz en el campo gravitacional». En esta breve nota, Einstein demostró el llamativo hecho de que el espacio mismo podía funcionar como una lente, curvando la luz y ampliándola, exactamente igual a como hacen las lentes de mis propias gafas de lectura.

Los de 1936 eran tiempos más amables y benévolos, y llama la atención el carácter informal de las palabras iniciales del artículo de Einstein, que, a fin de cuentas, se publicaba en una reconocida revista científica: «Hace cierto tiempo, R. W. Mandl me visitó y me pidió que publicara los resultados de unos pequeños cálculos que completé a petición suya. Con esta nota accedo a su deseo». Quizá se le permitió esta informalidad por ser él Einstein, y no otro; pero prefiero suponer que era producto de una era en la que los resultados científicos aún no se formulaban siempre en una lengua alejada del habla común.

Sea como fuere, el hecho de que la luz siguiera trayectorias curvas si el propio espacio se curvaba en presencia de la materia fue la primera predicción novedosa y significativa de la relatividad general, además del descubrimiento que le valió a Einstein la fama internacional, según ya he mencionado. Quizá no es de extrañar, por lo tanto, que ya en 1912 (según se ha descubierto en fecha reciente), cuando Einstein aún estaba lejos de completar su teoría de la relatividad general, nuestro físico realizara cálculos esencialmente idénticos a los que publicó en 1936 a instancias del señor Mandl; por entonces, Einstein intentaba encontrar algún fenómeno observable que pudiera convencer a los astrónomos de la necesidad de poner a prueba sus ideas. Tal vez porque en 1912 llegó a la misma conclusión que explicitó en su artículo de 1936 —es decir, que «no hay muchas posibilidades de observar este fenómeno»—, nunca se molestó en publicar aquel trabajo anterior. De hecho, tras examinar sus cuadernos de ambos períodos, no se puede afirmar con seguridad que, en 1936, recordara haber realizado los cálculos originales veinticuatro años atrás.

Lo que Einstein sí reconoció en ambas ocasiones es que la curvatura de la luz en un campo gravitatorio podía significar que, si un objeto brillante estaba situado muy por detrás de una distribución de masa intermedia, los rayos de luz emitidos en varias direcciones podían curvarse en torno de la distribución intermedia y luego convergir de nuevo, tal como hacen cuando atraviesan una lente normal; esto comportaría o bien una magnificación del objeto original o la producción de numerosas copias de la imagen del objeto original, algunas de las cuales podrían resultar distorsionadas (véase la figura siguiente).



Cuando calculó el efecto de lente que, según la predicción, una estrella distante experimentaría con una estrella intermedia en primer plano, ese efecto era tan reducido que parecía completamente inconmensurable, lo que lo llevó a hacer el comentario recogido más arriba: que

era improbable que un fenómeno tal se pudiera llegar a observar nunca. En consecuencia, Einstein supuso que su artículo apenas poseía valor práctico. Según escribió en la carta de presentación enviada a quien entonces era el editor de *Science*: «Y déjeme darle las gracias, también, por haber cooperado con esta pequeña publicación que me ha arrancado el señor Mandl. Apenas tiene valor, pero hará feliz a ese pobre hombre».

Sin embargo, Einstein no era astrónomo, y se requirió uno para que se diera cuenta de que la predicción de Einstein no solo podría ser mensurable, sino que además resultaría útil. Su utilidad vino de aplicarla al efecto de lente que tenían, sobre objetos distantes, sistemas mucho mayores, tales como galaxias o incluso cúmulos de galaxias; y no al efecto de lente provocado en unas estrellas por otras. A los pocos meses de publicarse el artículo de Einstein, un brillante astrónomo de Caltech, Fritz Zwicky, envió a la *Physical Review* una nota en la que demostraba cuán práctica era, precisamente, esta posibilidad (y también, indirectamente, reprochaba a Einstein que ignorase el posible efecto de lente derivado de las galaxias, y no de las estrellas).

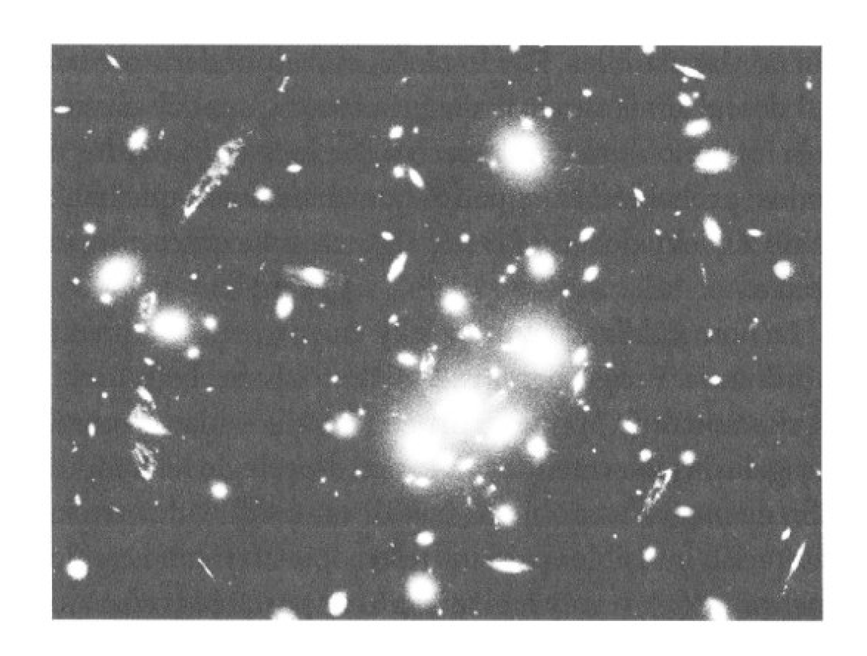
Zwicky era un personaje irascible y muy adelantado a su tiempo. Ya en 1933 había analizado el movimiento relativo de las galaxias en el cúmulo de Coma y, a partir de las leyes newtonianas del movimiento, determinó que las galaxias se desplazaban tan rápido que deberían haberse separado hasta destruir el cúmulo; salvo que en el cúmulo hubiera mucha más masa —por un factor superior a 100— que la representada solo por las estrellas. Por lo tanto, correspondería atribuirle a él el descubrimiento de la materia oscura, aunque en su tiempo la inferencia era tan

llamativa que la mayoría de los astrónomos, probablemente, pensó que al resultado que había obtenido Zwicky debería dársele alguna otra explicación, menos exótica.

La nota publicada por Zwicky en 1937 era igualmente extraordinaria. Propuso tres usos distintos para el efecto de lente gravitacional: (1) poner a prueba la relatividad general; (2) usar galaxias intermedias como una especie de telescopio, con el fin de magnificar objetos más distantes que, de otro modo, resultarían invisibles para los telescopios terrestres; y, lo más importante (3), resolver el misterio de por qué los cúmulos parecen pesar más de lo que se corresponde con la materia visible: «observar la deflexión de la luz en torno de las nebulosas puede proporcionar la determinación más directa de las masas nebulares y solventar la discrepancia mencionada más arriba».

La nota de Zwicky vio la luz hace hoy setenta y cuatro años, pero sigue leyéndose como una propuesta moderna de usar la lente gravitacional para poner a prueba el universo. De hecho, todas y cada una de las sugerencias que formuló se han hecho realidad, y la última es la más relevante de todas. Por el efecto de la lente gravitacional, en 1987 se vieron, por primera vez, quásares distantes gracias a galaxias intermedias; y en 1998, sesenta y un años después de que Zwicky propusiera pesar nebulosas mediante la lente gravitacional, se determinó la masa de un gran cúmulo por este medio.

Ese año, el físico Tony Tyson y varios compañeros de los Laboratorios Bell —cuya tradición, tan noble y Nobel, de gran ciencia, desde la invención del transistor al descubrimiento de la radiación del fondo cósmico de microondas, por desgracia se ha extinguido— observaron un cúmulo grande y

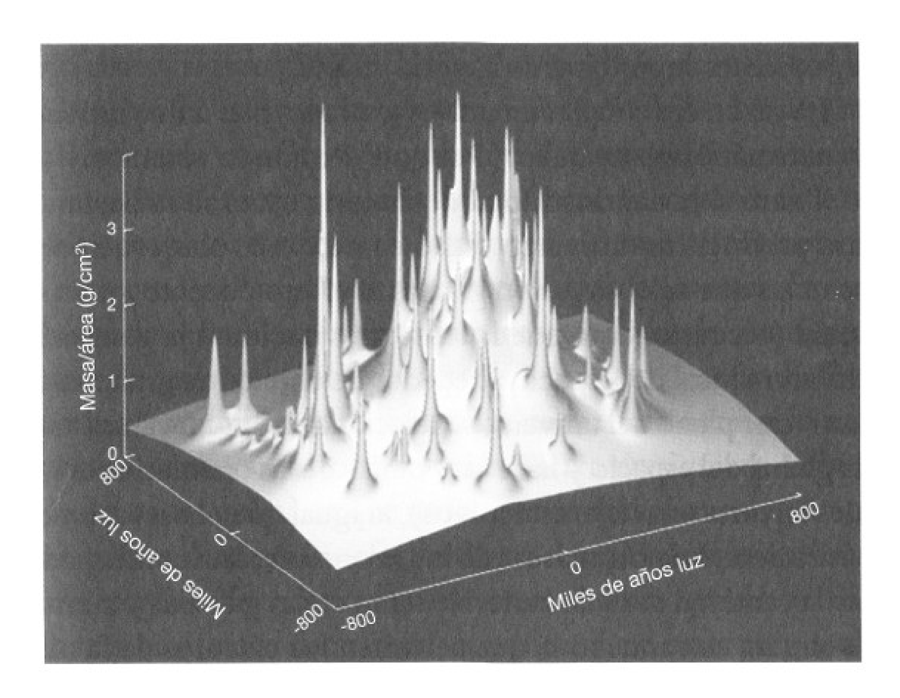


distante, bautizado con el vistoso nombre de CL 0024+1654 y situado a unos 5.000 millones de años luz. En la hermosa imagen superior, tomada por el Telescopio Espacial Hubble, cabe ver un ejemplo espectacular de la imagen múltiple de una galaxia distante situada a otros 5.000 millones de años luz; se ve como imágenes muy distorsionadas y alargadas entre el resto de galaxias, por lo general más redondeadas.

Contemplar esta imagen espolea la imaginación. En primer lugar, cada uno de los puntos de la foto es una galaxia, no una estrella. Cada galaxia contiene quizá unos 100.000 millones de estrellas, junto con, probablemente, cientos de miles de millones de planetas y, tal vez, civilizaciones perdidas. Digo aquí «perdidas» porque la imagen es de hace 5.000 millones de años. La luz se emitió 500 millones de años antes de que se formaran nuestro propio Sol y la Tierra. Muchas de las estrellas de esta foto ya

no existen, tras agotar su combustible nuclear hace miles de millones de años. Aparte de esto, las imágenes distorsionadas muestran precisamente lo que Zwicky defendió que sería posible. Las imágenes grandes y distorsionadas a la izquierda del centro de la imagen son versiones muy ampliadas (y alargadas) de esta galaxia distante que, de otro modo, probablemente resultaría del todo invisible.

Partir de esta imagen para determinar la distribución de masas que subyace en el cúmulo es todo un desafío matemático, complejo y complicado. Para hacerlo, Tyson tuvo que construir un modelo informático del cúmulo y seguir la pista de los rayos que emitía la fuente y atravesaban el cúmulo; seguirlos en todos los posibles caminos distintos y emplear las leyes de la relatividad general para determinar qué caminos eran los apropiados, hasta que los datos ajustados encajaran con las observaciones de los investigadores. Cuando pasó la tormenta, Tyson y sus colaboradores obtuvieron una imagen gráfica que indicaba con precisión dónde estaba situada la masa en este sistema retratado en la fotografía original:



En esta imagen ocurre algo extraño. Las puntas del gráfico representan la situación de las galaxias visibles en la imagen original, pero la mayor parte de la masa del sistema se halla *entre* las galaxias, con una distribución homogénea y oscura. De hecho, entre las galaxias hay una masa que multiplica por 40 la que contiene la materia visible del sistema (multiplica por 300 la masa contenida únicamente en las estrellas; el resto de la materia visible es gas caliente que las rodea). A todas luces, la materia oscura no queda restringida a las galaxias, sino que también predomina en la densidad de los cúmulos de galaxias.

A los físicos de partículas, como yo mismo, no nos sorprendió hallar que la materia oscura también domina los cúmulos. Aunque no teníamos ni una sola prueba directa, todos confiábamos en que la cantidad de materia oscura fuera suficiente para generar un universo plano, lo que significaba que, en el universo, debería haber un total de

materia oscura más de 100 veces superior al de materia visible.

La razón era simple: un universo plano es el único universo matemáticamente bello. ¿Por qué? Pronto lo veremos.

Tanto si la cantidad total de materia oscura era bastante para producir un universo plano como si no, observaciones como las que se obtuvieron gracias al efecto de lente gravitacional (recuerdo aquí que la lente gravitacional la genera la curvatura local del espacio alrededor de objetos de gran masa; el carácter plano del universo se relaciona con la curvatura media global del espacio y hace caso omiso de las ondulaciones locales en torno de objetos masivos), al igual que observaciones más recientes de otras áreas de la astronomía, han confirmado que la cantidad total de materia oscura en las galaxias y cúmulos supera con mucho la que permiten los cálculos de la nucleosíntesis del Big Bang. Ahora prácticamente tenemos la certeza de que la materia oscura —que, repito una vez más, se ha corroborado independientemente en toda clase de contextos astrofísicos distintos, desde las galaxias a los cúmulos de galaxias— debe constar de algo completamente nuevo; algo que no existe normalmente en la Tierra. Esta clase de materia, que no es materia estelar, tampoco es materia terrestre. ¡Pero *algo* sí que es!

Estas primeras inferencias de la materia oscura en nuestra galaxia han generado todo un nuevo campo de la física experimental; y personalmente me alegra decir que yo he tenido un papel en su desarrollo. Como he mencionado antes, hay partículas de materia oscura por todas partes: en la sala en la que estoy escribiendo tanto como «allá fuera», en el espacio. De ahí que podamos realizar experimentos

para buscar materia oscura y el nuevo tipo de partícula elemental (o partículas elementales) de la que aquella consta.

Estos experimentos se están realizando en minas y túneles bajo tierra, a gran profundidad. ¿Por qué bajo tierra? Porque en la superficie de nuestro planeta recibimos el bombardeo regular de toda clase de rayos cósmicos, tanto del Sol como de objetos situados mucho más lejos. Como la materia oscura, por su propia naturaleza, no interactúa electromagnéticamente para generar luz, damos por sentado que su interacción con la materia normal es extremadamente débil; por lo tanto, será extremadamente difícil detectarlas. Incluso si cada día nos bombardean millones de partículas de materia oscura, la mayoría nos atravesará y atravesará la Tierra sin siquiera «saber» que estamos aquí; y sin que nosotros nos demos cuenta. Así, si uno quiere detectar los efectos de las excepciones, muy raras, a esta regla —las partículas de materia oscura que en verdad rebotan en átomos de materia—, es necesario estar preparado para detectar cualquier acontecimiento raro e infrecuente. Y solo bajo tierra estamos lo bastante protegidos de los rayos cósmicos para que esto resulte posible, al menos en principio.

Mientras escribo esto, sin embargo, está emergiendo una posibilidad igual de emocionante. Acaba de ponerse en funcionamiento el Gran Colisionador de Hadrones, construido a las afueras de Ginebra, en Suiza: el acelerador de partículas mayor y más potente del mundo. Pero tenemos muchas razones para creer que, dada la altísima energía con la que el dispositivo hace chocar los protones, se recrearán condiciones similares a las que existían en el universo más antiguo; aunque solo ocurrirá en regiones de extensión microscópica. En tales regiones, las mismas

interacciones que podrían haber producido inicialmente, en los primeros tiempos del universo, lo que ahora son partículas de materia oscura, ¡podrían producir ahora partículas similares en el laboratorio! Así pues, está en marcha una gran carrera. ¿Quién detectará primero las partículas de materia oscura: los que experimentan bajo tierra o los que trabajan en el Gran Colisionador de Hadrones? La buena noticia es que, gane quien gane, nadie va a perder. Todos ganaremos, pues aprenderemos cuál es la sustancia última de la materia.

Aunque las mediciones astrofísicas que he descrito no revelan la identidad de la materia oscura, sí nos dicen cuánta existe. Ahora contamos con una determinación final y directa de la cantidad total de materia del universo, gracias a las hermosas inferencias de mediciones del efecto de lente gravitacional, como la que he descrito, combinadas con otras observaciones de emisiones de rayos X desde los cúmulos. Es posible realizar cálculos independientes de la masa total de los cúmulos porque la temperatura del gas en los cúmulos que están emitiendo los rayos X está relacionada con la masa total del sistema en el que se emiten. Los resultados fueron sorprendentes y, según he indicado anteriormente, para muchos científicos supusieron una decepción. Porque cuando «se asentó el polvo» —según la metáfora inglesa equivalente a «volvió la calma», pero también literalmente—, se determinó que la masa total de las galaxias y cúmulos (y sus alrededores) era de solo un 30% de la cantidad de masa total necesaria para que, en la actualidad, tengamos un universo plano. (Nótese que esto es más de 40 veces la masa que responde a la materia visible, la cual, por lo tanto, supone menos del 1% de la masa necesaria para tener un universo plano).

A Einstein le habría sorprendido el hecho de que su «pequeña publicación», con el tiempo, distara mucho de ser inútil. Al verse complementada con nuevas y notables herramientas experimentales y observacionales que abrieron nuevas ventanas al cosmos, nuevos desarrollos teóricos que le habrían asombrado y complacido, y el descubrimiento de la materia oscura, que probablemente habría elevado su presión sanguínea, el pequeño paso de Einstein en el mundo del espacio curvo se convirtió, con el paso del tiempo, en un gigantesco salto. A principios de los años noventa, parecía que se había conseguido el santo grial de la cosmología. Las observaciones habían resuelto que vivíamos en un universo abierto, tal que, en consecuencia, se expandiría para siempre. Aunque ¿era en verdad así?

LUZ DEL PRINCIPIO DE LOS TIEMPOS

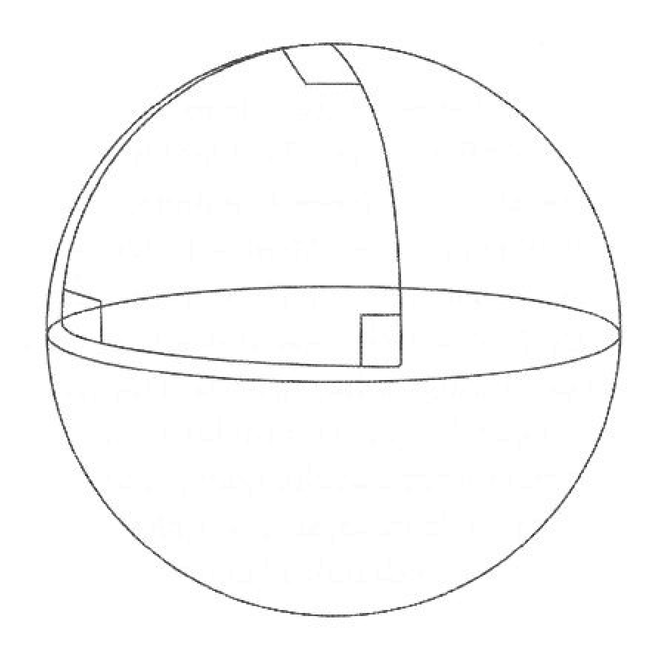
Así como era en un principio, es ahora y siempre lo será.

GLORIA PATRI

Si lo pensamos con detenimiento, pretender determinar la curvatura global del universo a través de mediciones de la masa total que en él se contiene y de aplicar las ecuaciones de la relatividad general con el objetivo de remontarnos hacia atrás puede suponernos enormes problemas. Es inevitable que nos preguntemos si hay materia oculta bajo formas que nos es imposible desvelar. Por ejemplo, nosotros solo podemos probar que dentro de estos sistemas hay materia si recurrimos a la dinámica gravitacional de sistemas visibles, como las galaxias y los cúmulos. Si en otra parte se albergara, de algún modo, una cantidad significativa de masa, se nos ocultaría. Sería mucho mejor medir la geometría de todo el universo visible de forma directa.

Pero ¿cómo podemos medir la geometría tridimensional de todo el universo visible? Es más fácil si empezamos por una pregunta más sencilla: ¿cómo determinaríamos que un objeto bidimensional, como la superficie de la Tierra, es curvo si no pudiésemos dar una vuelta a su alrededor o ascender por encima de ella, en un satélite, y mirar hacia abajo? Empecemos por preguntarle a un alumno de secundaria cuál es la suma de los ángulos de un triángulo. (Pero debemos escoger el instituto con cuidado; los europeos son apuesta segura). El estudiante nos dirá que son 180 grados, porque sin duda habrá aprendido geometría euclídea; la geometría asociada a los trozos de papel planos. En una superficie bidimensional curva, como un globo,

podemos dibujar un triángulo cuyos ángulos sumarán mucho más de 180 grados. Imaginemos, por ejemplo, que trazamos una línea a lo largo del ecuador y que luego trazamos un ángulo recto que suba hasta el Polo Norte, y luego otro ángulo recto que baje hasta el ecuador, como se ve más abajo. Tres veces 90 es 270, mucho más que 180 grados. *Voila!*



Resulta que este pensamiento bidimensional sencillo se aplica directa e idénticamente a las tres dimensiones, porque los matemáticos que propusieron por vez primera geometrías no planas, las llamadas no euclídeas, comprendieron que en las tres dimensiones se podían dar las mismas posibilidades. De hecho, el matemático más famoso del siglo XIX, Carl Friedrich Gauss, quedó tan fascinado ante la posibilidad de que nuestro universo fuera curvo que en las décadas de 1820 y 1830 extrajo datos de mapas geodésicos para medir triángulos de grandes dimensiones trazados entre los picos montañosos alemanes de Hoher

Hagen, Inselsberg y Brocken; con ello pretendía descubrir si se podía detectar alguna curvatura del espacio en sí mismo. Por descontado, el hecho de que las montañas estén en una superficie curva como la de la Tierra implica que esta curvatura bidimensional de la superficie terrestre habría interferido en cualquier medición realizada para probar la curvatura del espacio tridimensional de fondo en el que se sitúa la Tierra, cosa que él ya debió de tener en cuenta. Yo supongo que su intención era restar cualquier contribución de esta naturaleza de sus resultados finales para ver si cualquier posible curvatura restante podría atribuirse a una curvatura del espacio de fondo.

La primera persona que intentó medir definitivamente la curvatura del espacio fue un matemático poco conocido, Nikolái Ivánovich Lobachevski, que vivió en la remota Kazán, en Rusia. A diferencia de Gauss, Lobachevski fue de hecho uno de los dos matemáticos lo suficientemente temerarios como para proponer, por escrito, la posibilidad de la llamada geometría hiperbólica curva, donde las líneas paralelas podían divergir. Es asombroso que Lobachevski publicase su trabajo sobre geometría hiperbólica (lo que hoy llamamos universos «con curvatura negativa» o «abiertos») en 1830.

Al poco tiempo, mientras estaba considerando la posibilidad de que tal vez nuestro propio universo tridimensional pudiera ser hiperbólico, Lobachevski sugirió que quizá se podría investigar un triángulo estelar para resolver experimentalmente el problema». Él propuso observar la brillante estrella Sirio cuando la Tierra estuviera a uno u otro lado de su órbita alrededor del Sol, con seis meses de diferencia. A partir de ciertas observaciones, concluyó que cualquier curvatura de nuestro universo debía

sumar, *al menos*, 166.000 veces el radio de la órbita terrestre.

Parece una cifra elevada, pero en la escala cósmica resulta trivial. Por desgracia, aunque Lobachevski dio con la idea correcta, estaba limitado por la tecnología de su tiempo. Sin embargo, 150 años después, las cosas han mejorado gracias a la serie de observaciones más importante de toda la cosmología: las mediciones de la radiación del fondo cósmico de microondas o RFCM.

La RFCM no es otra cosa que el resplandor residual del Big Bang. Nos ofrece otra prueba directa, si es que se necesita alguna más, de que el Big Bang sucedió realmente, porque nos permite mirar hacia atrás de forma directa y descubrir la naturaleza del caliente y jovencísimo universo del que más tarde emergieron todas las estructuras que hoy vemos.

Una de las muchas cosas extraordinarias de la radiación del fondo cósmico de microondas es que, de todos los lugares posibles, la descubrieron en Nueva Jersey dos científicos que en realidad no tenían la menor idea de lo que buscaban. El otro factor asombroso es que, durante décadas, tuvimos esa radiación ante nuestras narices; podríamos haberla observado, pero se nos escapó por completo. De hecho, quizá tenga usted la edad suficiente como para haber sido testigo de sus efectos —sin ser consciente de ello— si recuerda la época en que no existía todavía la televisión por cable, cuando las cadenas solían cerrar sus emisiones en la madrugada y no pasaban publirreportajes toda la noche. Cuando se terminaba la emisión, tras la carta de ajuste, la pantalla volvía a quedar estática. Cerca del 1% de la estática que aparecía en la pantalla era radiación residual del Big Bang.

El origen de la radiación del fondo cósmico de

microondas es relativamente sencillo. Como el universo tiene una edad finita (recuérdese: 13.720 millones de años) y, a medida que observamos objetos cada vez más distantes, más atrás en el tiempo se remonta nuestra mirada (ya que, desde esos objetos, la luz tarda más en llegar hasta nosotros), podríamos imaginar que, si observáramos lo bastante lejos, contemplaríamos el mismísimo Big Bang. En principio, no es algo imposible; pero en la práctica, entre nosotros y aquel tiempo primero se levanta un muro. No es un muro material, como las paredes de la habitación en la que escribo estas palabras, pero en gran medida provoca la misma consecuencia.

No veo lo que hay al otro lado de las paredes de mi cuarto porque son opacas. Absorben la luz. Pues bien, cuando al contemplar el cielo retrocedo cada vez más en el tiempo, estoy mirando un universo cada vez más joven y también más caliente, puesto que empezó a enfriarse a partir del Big Bang. Si echo la vista lo suficientemente atrás, hasta un momento en que el universo tenía cerca de 300.000 años, su temperatura rondaba los 3.000 grados (kelvin) sobre el cero absoluto. A esta temperatura, la radiación ambiental estaba cargada de tanta energía que podía separar los átomos dominantes del universo —los de hidrógeno— en sus distintos constituyentes: protones y electrones. Antes de ese momento, la materia neutra no existía. La materia normal en el universo, formada por núcleos atómicos y electrones, estaba compuesta de un «plasma» denso de partículas cargadas que interactuaban con la radiación.

Sin embargo, un plasma puede ser opaco a la radiación. Las partículas cargadas en el interior del plasma absorben fotones y los liberan de modo que la radiación no puede

atravesar fácilmente un material de este tipo sin interrupción. En consecuencia, si intento mirar atrás en el tiempo, no podré ver más allá de la época en que la materia del universo estuvo, por última vez, compuesta sobre todo de aquella clase de plasma.

Vuelve a ser como con las paredes de mi habitación. Puedo verlas solo porque los electrones de los átomos que están en la superficie de la pared absorben luz de la luz de mi estudio y luego la vuelven a emitir, y el aire que hay entre las paredes y yo es transparente, de modo que puedo ver todo lo comprendido hasta la superficie de la pared que emitió la luz. Lo mismo sucede con el universo. Cuando miro hacia fuera, puedo reseguir todo el camino de vuelta hasta esa «superficie de la última dispersión», que es el punto en el que el universo se volvió neutro, en el que se combinaron protones con electrones para formar átomos de hidrógeno neutro. Tras este punto, el universo se hizo en buena medida transparente a la radiación, y ahora podemos ver la radiación que los electrones absorbieron y emitieron de nuevo cuando la materia del universo se volvió neutra.

Por lo tanto, la concepción del universo que parte del Big Bang *predice* que deberíamos recibir radiación que provendrá de todas direcciones, desde aquella «superficie de la última dispersión». Como desde entonces el universo se ha expandido multiplicándose por 1.000 (más o menos), la radiación se ha enfriado en el camino y ahora está aproximadamente a 3 grados sobre el cero absoluto. Y esta es precisamente la señal que los dos científicos descubrieron en Nueva Jersey en 1965 y cuyo hallazgo les valió, años después, el premio Nobel.

Lo cierto es que, más recientemente, se ha otorgado un segundo —y bien merecido— Nobel por las observaciones

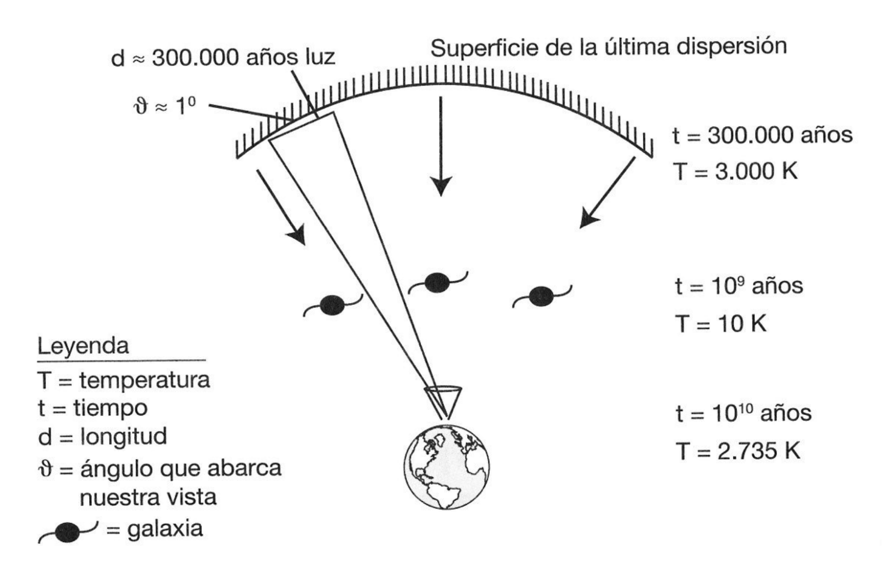
sobre la radiación del fondo cósmico de microondas. Si pudiéramos tomar una fotografía de la superficie de la «superficie de la última dispersión» tendríamos un retrato de un universo neonato de tan solo 300.000 años de vida. Podríamos ver todas las estructuras que un día se colapsarían para dar lugar a las galaxias, estrellas, planetas, alienígenas y todo lo demás. Lo que es más importante, estas estructuras no se habrían visto afectadas por toda la evolución dinámica posterior que puede oscurecer la naturaleza subyacente así como el origen de las primeras perturbaciones primordiales y diminutas en la materia y en la energía creadas, presumiblemente, mediante procesos exóticos en los primeros momentos del Big Bang.

Más importante para nuestro propósito, sin embargo, es que en esta superficie existiría una escala específica, grabada precisamente por el propio tiempo. Podríamos entenderlo así: si tomamos una distancia que abarca cerca de 1 grado sobre la superficie de la última dispersión, según la ve un observador en la Tierra, esta se correspondería con una distancia en esa superficie de cerca de 300.000 años luz. Entonces, teniendo en cuenta que la superficie de la última dispersión refleja una época en la que el propio universo contaba con cerca de 300.000 años y teniendo en cuenta también que Einstein nos dice que ninguna información puede desplazarse por el espacio a una velocidad superior a la de la luz, esto significa que ninguna señal procedente de un punto determinado podía recorrer en la superficie de aquella época más de 300.000 años luz aproximadamente.

Ahora imaginemos un fragmento de materia de un diámetro inferior a 300.000 años luz. Este fragmento habrá empezado a colapsarse por su propia gravedad. Pero no así —ni siquiera habrá empezado a colapsarse— un fragmento

de un diámetro superior a 300.000 años luz, porque aún no «sabe» siquiera que es un fragmento. La gravedad, que en sí se propaga a la velocidad de la luz, no puede haber recorrido todo el fragmento. Por tanto, igual que el Coyote de los dibujos animados del Correcaminos sobrepasa corriendo el borde del acantilado y se queda suspendido en el aire, el fragmento se quedará ahí quieto, esperando para colapsarse a que el universo tenga la edad suficiente y él sepa qué se supone que ha de hacer.

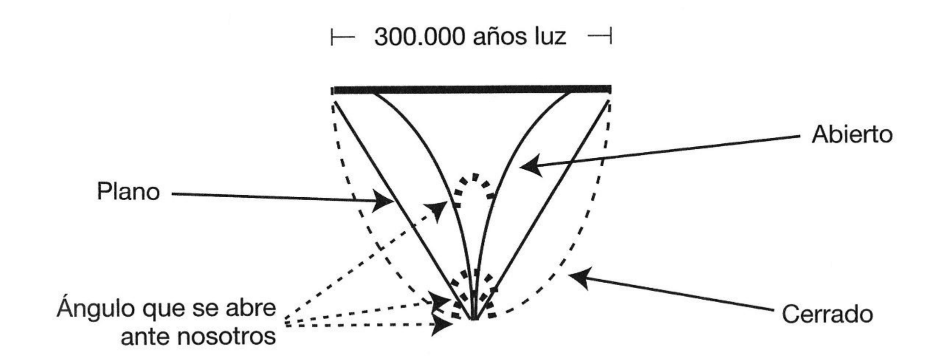
Esto destaca un triángulo especial, con un lado de 300.000 años luz de longitud, a una distancia conocida lejos de nosotros, determinada por la distancia entre nosotros y la superficie de la última dispersión, como se muestra en la figura siguiente:



Los mayores fragmentos de materia, que ya habrán empezado a colapsarse y con ello producirán irregularidades en la imagen de la superficie del fondo de microondas, abarcarán esta escala angular. Si conseguimos obtener una imagen de esta superficie con el aspecto que tenía entonces,

esperaríamos que aquellos puntos calientes fueran, de media, los fragmentos significativos más grandes vistos en la imagen.

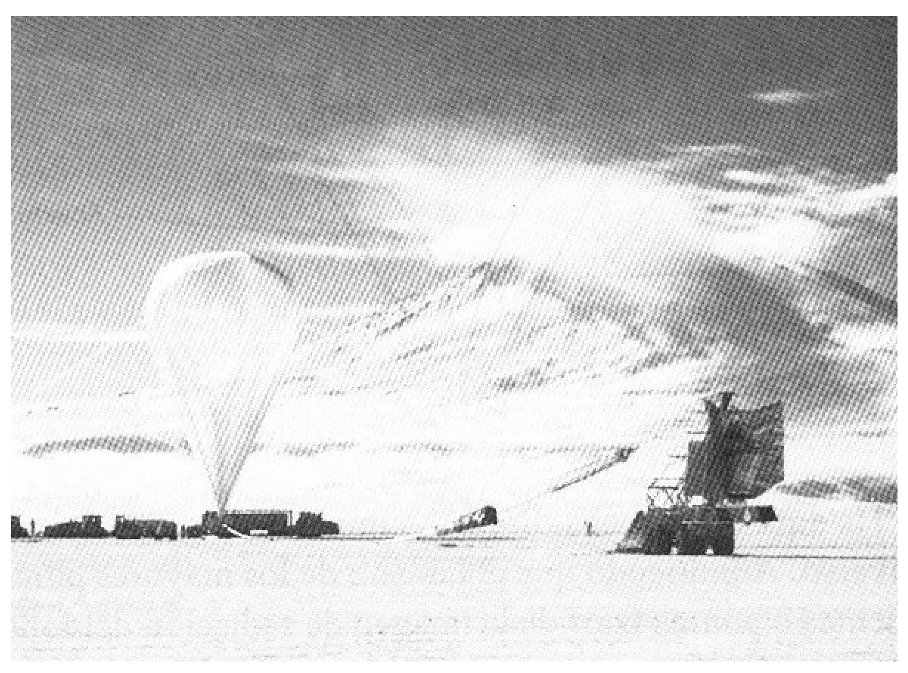
Sin embargo, que el ángulo abarcado por esta distancia sea precisamente de 1 grado vendrá determinado, de hecho, por la geometría del universo. En un universo plano, los rayos de luz viajan en línea recta. En un universo abierto, en cambio, los rayos de luz se curvan hacia el exterior a medida que los seguimos hacia atrás en el tiempo. En un universo cerrado, los rayos de luz convergen cuando los seguimos hacia atrás. Por tanto, el verdadero ángulo que abre ante nuestros ojos una medida de un ancho de 300.000 años luz, situada a una distancia asociada a la superficie de la última dispersión, depende de la geometría del universo, como vemos a continuación:



He aquí una prueba directa y limpia de la geometría del universo. Admitiendo que el tamaño de los mayores puntos calientes o puntos fríos de la imagen de radiación del fondo de microondas depende tan solo de la causalidad —el hecho de que la gravedad solo pueda propagarse a la velocidad de la luz y, de ahí, que la mayor región susceptible de haberse colapsado en aquel momento esté determinada simplemente por la distancia más larga que un rayo de luz pudiera haber

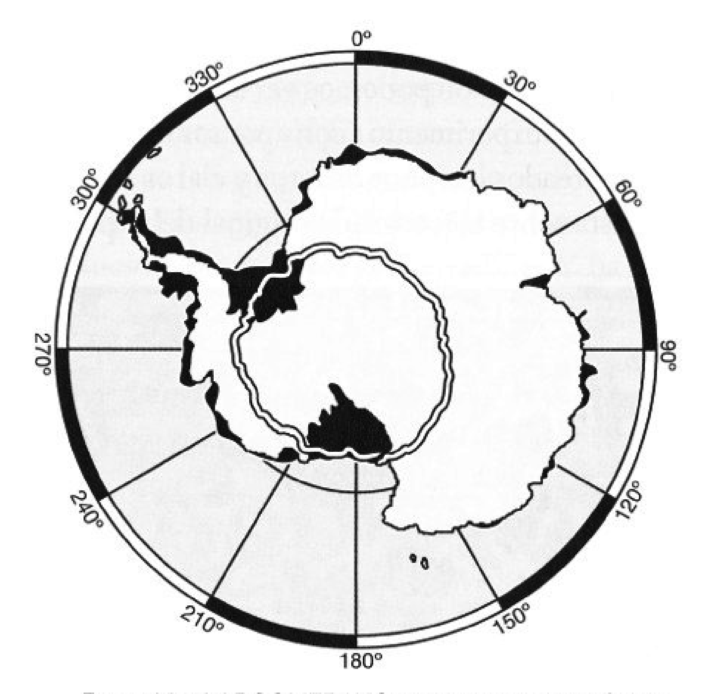
recorrido entonces— y admitiendo que el ángulo abierto ante nosotros por una medida fija a una distancia fija de nuestra situación lo determina solo la curvatura del universo, una simple imagen de la superficie de la última dispersión puede revelarnos la geometría del espacio-tiempo a gran escala.

El primer experimento que trató de realizar esta clase de observación se llevó a cabo con el BOOMERANG, un globo lanzado en 1997 desde el suelo antártico. Aunque el nombre responde a unas siglas que significan Observaciones en Globo de Geofísica y Radiación Extragaláctica Milimétrica, en realidad se lo denominó así por una razón más simple. Al globo estratosférico se le adjuntó un radiómetro de microondas, como vemos a continuación:



El globo dio la vuelta al mundo, lo cual resulta sencillo si uno se encuentra en la Antártida. En realidad, en el Polo Sur es algo extraordinariamente fácil, porque basta con darse una vuelta describiendo un círculo. Sin embargo,

desde la estación McMurdo el viaje circular alrededor del continente, con la ayuda de los vientos polares, se prolongó dos semanas tras las cuales el artefacto regresó a su punto de partida, y de ahí el nombre de BOOMERANG.

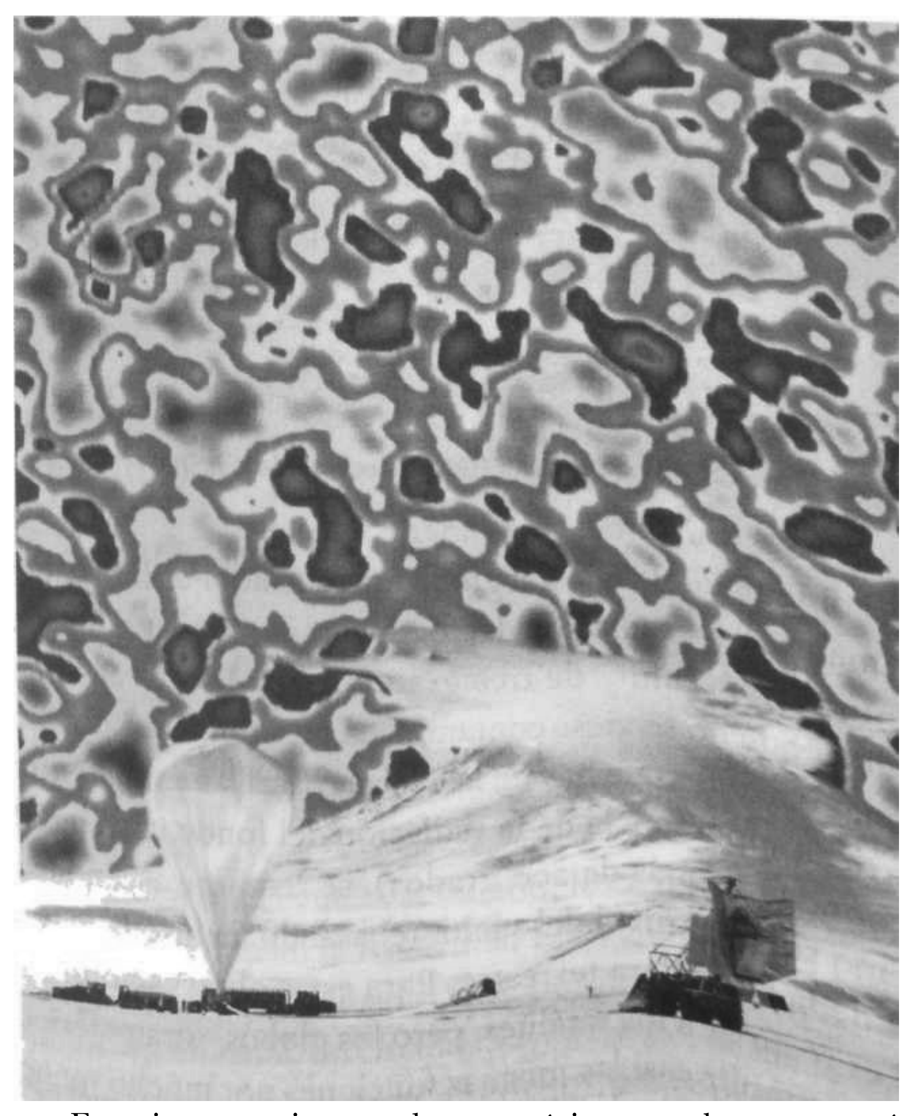


Recorrido del BOOMERANG alrededor de la Antártida

El objetivo del viaje del globo era sencillo. Para conseguir una imagen de la radiación del fondo de microondas que reflejase una temperatura de tres grados sobre el cero absoluto (kelvin), que no se viese contaminada por los materiales mucho más calientes que hay en la Tierra (hasta las temperaturas antárticas superan a la de la radiación del fondo cósmico de microondas en más de 200 grados), se requiere ascender al máximo sobre el nivel del suelo, rebasando incluso la mayor parte de la atmósfera terrestre. Para estas observaciones, lo ideal es recurrir a los satélites, pero los globos estratosféricos pueden cumplir casi

las mismas funciones por mucho menos dinero.

En cualquier caso, tras dos semanas, el BOOMERANG devolvió una imagen de una pequeña porción del cielo de microondas en la que se veían los puntos calientes y fríos del modelo de radiación proveniente de la superficie de la última radiación. A continuación podemos ver una imagen de la región observada en este experimento (con «puntos calientes» y «puntos fríos» sombreados en tonos oscuros y claros respectivamente), superpuesta sobre la fotografía original del experimento.

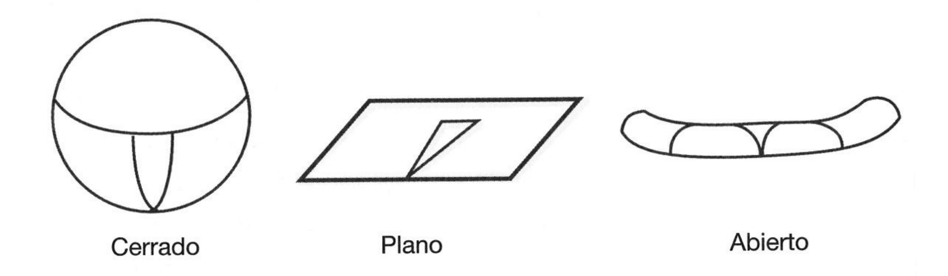


Esta imagen sirve a dos propósitos, en lo que a mí respecta. Primero, nos muestra la verdadera escala física de los puntos calientes y fríos tal como el BOOMERANG los vio en el cielo, con las imágenes de primer plano para comparar. Pero, al mismo tiempo, ilustra otro aspecto importante de algo que solo podemos llamar nuestra miopía cósmica. Cuando en un día soleado levantamos la vista, vemos un cielo azul, como el que se ve en la primera imagen del

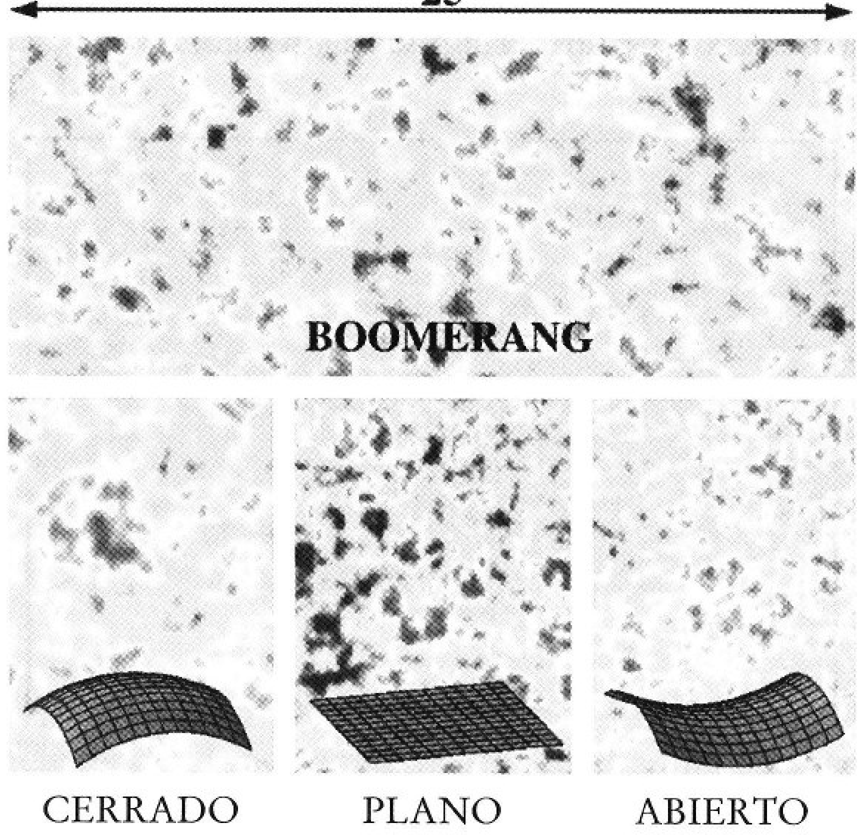
globo. Pero esto se debe a que hemos evolucionado para ver la luz visible. Y ha sido así, sin duda, por dos razones: porque la luz de la superficie de nuestro Sol alcanza su máximo nivel en la región visible y también porque muchas otras longitudes de onda de luz quedan absorbidas en nuestra atmósfera, de modo que no pueden llegar hasta nosotros en la superficie terrestre. (Tenemos suerte, porque buena parte de esta radiación podría resultarnos perjudicial). Sea como sea, si hubiéramos evolucionado en el sentido inverso para «ver» la radiación de microondas, la imagen que captaríamos del cielo, de día o de noche, mientras no estuviéramos mirando directamente al Sol, nos remontaría directamente a una imagen de la superficie de la última dispersión, a una distancia de más de 13.000 millones de años luz. Esta es la «imagen» que nos devolvió el detector del BOOMERANG.

El primer vuelo del globo, el que generó esta imagen, fue extraordinariamente afortunado. La Antártida es un entorno hostil e impredecible. En un vuelo posterior, en 2003, todo el experimento estuvo a punto de perderse por un fallo del globo y una tormenta posterior. En el último minuto se decidió desprenderse del globo antes de que el viento lo empujase a un lugar inaccesible y esto salvó la situación; una misión de búsqueda y rescate localizó la carga en una llanura antártica y recuperó el contenedor presurizado con los datos científicos. Antes de interpretar la imagen del BOOMERANG, quiero hacer hincapié una vez más en que el auténtico tamaño físico de los puntos calientes y fríos registrados en la imagen del BOOMERANG están determinados por una física simple relacionada con la superficie de la última dispersión, mientras que el tamaño *medido* de los puntos calientes y puntos fríos en la imagen deriva de la geometría del universo. Una sencilla analogía

bidimensional quizá ayude a explicar mejor el resultado: en dos dimensiones, una *geometría cerrada* se parece a la superficie de una esfera, mientras que una *geometría abierta* se parece a la superficie de una silla de montar. Si dibujamos un triángulo sobre estas superficies, observaremos el efecto que he descrito: las líneas rectas convergen en la esfera, divergen en la silla y, por supuesto, se mantienen rectas en el terreno plano.



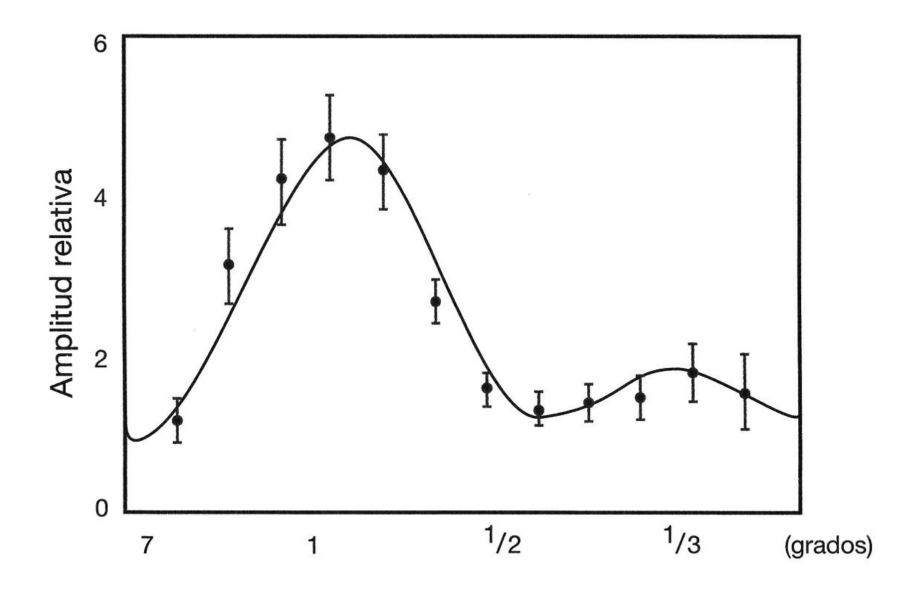
Por lo tanto, ahora la pregunta del millón es: ¿de qué tamaño *son* los puntos calientes y los puntos fríos en la imagen del BOOMERANG? Para darle respuesta, el equipo colaborador del BOOMERANG preparó en sus ordenadores varias simulaciones de imágenes de los puntos calientes y los puntos fríos según se verían en universos cerrados, planos y abiertos, y las comparó con otra imagen (coloreada también) del verdadero cielo de microondas.



Si examinamos la imagen inferior izquierda, la que simula un universo cerrado, veremos que, en promedio, los puntos son mayores que en el universo real. A la derecha, el tamaño medio de los puntos es menor. Pero, como la cama del osito en «Ricitos de Oro», la imagen central, que corresponde al universo plano, es «perfecta». El universo matemáticamente bello que los teóricos esperaban hallar, pareció confirmarse con esta observación, aunque parece entrar en grave conflicto con los cálculos realizados al pesar los cúmulos de galaxias.

De hecho, la concordancia entre las predicciones de un universo plano y la imagen obtenida por el BOOMERANG casi

resulta violenta. Tras examinar los puntos y buscar los de mayor tamaño que tuvieron tiempo suficiente para haberse colapsado significativamente hacia el interior en la época reflejada en la superficie de la última dispersión, el equipo del BOOMERANG generó el siguiente gráfico:



Los datos son los puntos. La línea continua ofrece la predicción de un universo plano, donde la mayor protuberancia ¡ocurre cerca de 1 grado!

Después de que el experimento BOOMERANG publicase sus resultados, la NASA para investigar la radiación del fondo de microondas lanzó un satélite mucho más sensible: la WMAP o Sonda Wilkinson de Anisotropía de Microondas. Recibió este nombre por el difunto físico de Princeton David Wilkinson, que fue uno de los primeros físicos de Princeton que debería haber descubierto la RFCM si no se le hubieran adelantado los físicos de los Laboratorios Bell; la WMAP se lanzó en junio de 2001. Se envió a una distancia de aproximadamente 1.600.000 kilómetros de la

Tierra donde, en la cara oscura de la Tierra con respecto al Sol, pudo contemplar el cielo de microondas sin contaminación de la luz solar. Durante un periodo de siete años, tomó imágenes de todo el cielo de microondas (no solo de una parte del cielo, como el BOOMERANG, que había tenido que lidiar con la presencia de la Tierra bajo él), con una precisión inaudita.



Aquí, todo el cielo se proyecta sobre un plano, igual que la superficie de un globo se puede proyectar sobre un mapa planisferio. En este mapa, el plano de nuestra galaxia se situaría a lo largo del ecuador, el Polo Norte está 90 grados por encima del plano de nuestra galaxia y el Polo Sur 90 grados por debajo. Sin embargo, la imagen de la galaxia se ha eliminado del mapa para reflejar estrictamente la radiación que proviene de la superficie de la última dispersión.

Con estos datos tan exquisitos, se pueden llevar a cabo cálculos de la geometría del universo mucho más precisos. Un recuadro de la WMAP análogo al que nos mostró la imagen del BOOMERANG confirma con una precisión del 1% que ¡vivimos en un universo plano! Las expectativas de los teóricos se confirmaron. Pero, una vez más, no podemos

pasar por alto la incoherencia aparentemente obvia de este resultado con el resultado que describí en el capítulo anterior. Pesar el universo midiendo la masa de las galaxias y los cúmulos da un valor menor en un factor de 3 que la cantidad necesaria para que resulte un universo plano. Algo tendrá que cambiar. Aunque los teóricos se puedan haber congratulado de conjeturar que el universo es plano, casi nadie estaba preparado para la sorpresa que la naturaleza se guardaba en la manga para resolver los cálculos contradictorios de la geometría del universo provenientes de las mediciones de masa frente a las mediciones directas de la curvatura. Resultó que la energía perdida necesaria para un universo plano estaba escondida ante nuestras mismas narices, literalmente.

MUCHO RUIDO POR NADA

Menos es más.

LUDWIG MIES VAN DER ROHE, a partir de ROBERT BROWNING

Un paso adelante y dos atrás; o así parecíamos avanzar en el intento de comprender el universo y ponerle cara fidedigna. Aunque las observaciones habían determinado, por fin de forma definitiva, la curvatura de nuestro universo —y, en el proceso, validaron sospechas teóricas sostenidas durante mucho tiempo— de repente, aun sabiendo que en el universo existe diez veces más materia de la que se puede atribuir a los protones y los neutrones, ni siquiera toda esta enorme cantidad de materia oscura —que suma el 30% de lo que se necesitaba para producir un universo plano— era ni de lejos suficiente como para explicar toda la energía en el universo. La medición directa de la geometría del universo y el consiguiente descubrimiento de que el universo es en efecto plano significó que el 70% de la energía del universo seguía sin localizar; ni dentro de las galaxias ni a su alrededor ¡ni siquiera en los cúmulos de galaxias! La situación no fue tan escandalosa como la he planteado. Incluso antes de esas mediciones de la curvatura del universo y de que se determinase el total de masa acumulada en él (tal como se describe en el capítulo 2), había señales de que la concepción teórica de nuestro universo por entonces convencional —con suficiente materia oscura para ser espacialmente plano (en realidad, 3 veces más de lo que hoy sabemos que existe)— simplemente no era coherente con las observaciones. De hecho, ya en 1995 redacté un artículo herético junto con mi colega Michael Turner de la Universidad de Chicago sugiriendo

que esta concepción convencional no podía ser correcta; en realidad, la única posibilidad que parecía coherente tanto con el universo plano (nuestra preferencia teórica entonces) como con las observaciones de las agrupaciones de galaxias y su dinámica interna era imaginar un universo mucho más extraño. Sugeríamos atender de nuevo a una idea teórica disparatada que Albert Einstein formuló en 1917 —y luego abandonó— para resolver la aparente contradicción entre las predicciones de su teoría y el universo estático en el que creía que vivíamos.

Según recuerdo, nuestra motivación en aquella época se encaminaba más a demostrar que algo fallaba en el conocimiento imperante que a sugerir una solución definitiva para el problema. La propuesta parecía demasiado alocada para creer en ella seriamente, por lo que supongo que nadie quedó más sorprendido que nosotros mismos cuando, al cabo de tres años, resultó que nuestra propuesta herética estaba, después de todo, en lo cierto.

Volvamos a 1917. Recordemos que Einstein había desarrollado la relatividad general y había sentido palpitaciones de alegría al descubrir que podía explicar la precesión del perihelio de Mercurio, aun teniendo que afrontar el hecho de que su teoría no podía explicar el universo estático en el que creía vivir. De haber creído más en sus convicciones, quizás habría *predicho* que el universo no podía ser estático. Pero no lo hizo. En lugar de ello, vio que podía introducir un pequeño cambio en su teoría, un cambio absolutamente coherente con los argumentos matemáticos que lo habían llevado a desarrollar la relatividad general en primer lugar y que, según parecía, tal vez podría permitir un universo estático.

Aunque los detalles son complejos, la estructura general

de las ecuaciones de la relatividad general de Einstein es relativamente sencilla. La parte izquierda de la ecuación describe la curvatura del universo, y con ello la potencia de las fuerzas gravitatorias que actúan sobre la materia y la radiación. Estas las determina la cantidad indicada en la parte derecha de la ecuación, que refleja la densidad total de todas las clases de energía y materia dentro del universo.

Einstein vio que añadir un pequeño término constante a la izquierda de la ecuación implicaría añadir otra pequeña fuerza *de repulsión* constante en todo el espacio además de la atracción gravitatoria estándar entre objetos distantes, que disminuye a medida que aumenta la distancia entre ellos. De ser lo suficientemente pequeña, esta fuerza adicional podría resultar indetectable a escala humana o incluso a escala de nuestro sistema solar, donde se observa que la ley de la gravedad de Newton impera con tanta belleza. Pero Einstein razonó que, como era constante en todo el espacio, podía acumularse hasta superar la escala de nuestra galaxia y ser lo bastante grande para contrarrestar las fuerzas de atracción entre objetos muy distantes. Así pues, creyó que de aquí podría resultar un universo estático a máxima escala.

Einstein llamó *término cosmológico* a este término añadido. Pero, como se trata simplemente de un añadido constante a las ecuaciones, hoy día lo habitual es llamarlo la *constante cosmológica*. Cuando reconoció que, de hecho, el universo está en expansión, Einstein prescindió de este término y, según se cuenta, él mismo calificó la decisión de introducirlo en sus ecuaciones como su mayor torpeza.

Pero no es tan fácil librarse de este término. Es como intentar devolver la pasta de dientes al tubo. Ahora tenemos un concepto completamente distinto de la constante

cosmológica, de modo que, si Einstein no hubiera añadido el término, alguna otra persona lo habría hecho en los años siguientes.

Trasladar el término de Einstein de la izquierda de la ecuación a la derecha es un pequeño paso para un matemático… pero un gran salto para un físico. Aunque este cambio resulte trivial a nivel matemático, una vez situado el término a la derecha —donde se encuentran todos los términos que contribuyen a la energía del universo—, este representa algo completamente distinto a ojos del físico: una nueva contribución a la energía total. Pero ¿qué —qué tipo de cosa— puede aportar un término como este?

Y la respuesta es: *nada*.

Cuando digo *nada*, no quiero decir nada, sino más bien *nada*; en este caso, la *nada* a la que solemos denominar espacio vacío. Es decir, si tomamos una región espacial y sacamos todo lo que hay dentro —polvo, gas, gente e incluso la radiación que la atraviesa; eso es, absolutamente *todo* lo que hay dentro de la región—, y el espacio vacío restante *pesa algo*, esto se correspondería con la existencia de un término cosmológico como el que inventó Einstein.

¡Y así, la constante cosmológica de Einstein parece aún más disparatada! Porque cualquier estudiante de secundaria podrá decirnos cuánta energía se contiene en nada, aun sin saber qué es la energía. La respuesta tiene que ser: nada.

Pero, por desgracia, la mayoría de alumnos de secundaria no han dado mecánica cuántica ni han estudiado la relatividad. Porque cuando uno incorpora los resultados de la teoría especial de la relatividad de Einstein en el universo cuántico, el espacio vacío se vuelve mucho más extraño que antes. En realidad, se vuelve tan extraño que hasta a los físicos que descubrieron y analizaron por primera

vez este nuevo comportamiento les costó creer que existía de verdad en el mundo real.

La primera persona que incorporó con éxito la relatividad a la mecánica cuántica fue el lacónico y brillante Paul Dirac, un físico teórico británico que ya había protagonizado un papel fundamental en el desarrollo de la mecánica cuántica como teoría.

La mecánica cuántica se desarrolló entre 1912 y 1927, ante todo gracias al trabajo del brillante y reconocido físico danés Niels Bohr, al brillante joven y célebre físico austríaco Erwin Schrödinger y al físico alemán Werner Heisenberg. El mundo cuántico propuesto en primer lugar por Bohr y perfeccionado a nivel matemático por Schrödinger y Heisenberg desafía todos los conceptos de sentido común fundamentados en nuestra experiencia con objetos a escala humana. Bohr empezó proponiendo que los electrones de los átomos orbitaban alrededor del núcleo central, como los planetas alrededor del Sol, pero demostró que las reglas observadas en los espectros atómicos (las frecuencias de luz emitidas por elementos distintos) solo podían comprenderse si de algún modo los electrones estaban obligados a tener órbitas estables en una serie fija de «niveles cuánticos» y no podían girar libremente en espiral hacia el núcleo. Podían moverse entre niveles, al absorber o emitir solo frecuencias discretas, o cuantos, de luz; los mismos cuantos que Max Plank había propuesto por primera vez en 1900 para explicar las formas de radiación emitidas por objetos calientes.

Sin embargo, las «reglas de cuantización» de Bohr eran demasiado *ad hoc*. En la década de 1920, Schrödinger y Heisenberg demostraron, por separado, que era posible derivar estas reglas de principios primeros si los electrones

obedecían reglas de la dinámica distintas a las aplicadas a objetos macroscópicos como pelotas de béisbol. Los electrones podían comportarse como ondas y como partículas dispersándose, aparentemente, por el espacio (de ahí la «función de onda» de Schrödinger para los electrones) y se demostró que los resultados de la medición de las propiedades de los electrones arrojaban solo determinaciones probabilísticas, con varias combinaciones de propiedades distintas que no se podían medir exactamente en el mismo momento (de ahí el «principio de incertidumbre» de Heisenberg).

Dirac había demostrado que las matemáticas propuestas por Heisenberg para describir los sistemas cuánticos (que le valieron al alemán el premio Nobel en 1932) podían derivarse a través de una cuidada analogía con las famosas leyes que gobernaban la dinámica de los objetos macroscópicos clásicos. Además, más tarde fue igualmente capaz de demostrar que la «mecánica ondulatoria» matemática de Schrödinger también podía derivarse así y equivalía, formalmente, a la formulación de Heisenberg. Pero Dirac también sabía que la mecánica cuántica de Bohr, Heisenberg y Schrödinger, aun siendo tan extraordinaria, solo funcionaba en sistemas donde las leyes de Newton —no la relatividad de Einstein— habrían sido las adecuadas para gobernar los sistemas clásicos por analogía con los cuales se construyeron los sistemas cuánticos.

Dirac prefería pensar en términos matemáticos antes que con imágenes, y cuando se concentró en tratar de alcanzar una coherencia entre la mecánica cuántica y las leyes de la relatividad de Einstein, empezó a jugar con muchos tipos distintos de ecuaciones. Utilizó complejos

sistemas matemáticos multicomponentes, necesarios para incorporar el hecho de que los electrones tuvieran «espín»; esto es, que giran (*spin*) a la manera de pequeñas peonzas y tienen momento angular, y que además pueden girar alrededor de cualquier eje tanto en el sentido de las agujas del reloj como a la inversa.

En 1929 topó con un filón. La ecuación de Schrödinger había descrito con precisión y belleza el comportamiento de los electrones que se desplazan a velocidades muy inferiores a la de la luz. Dirac descubrió que si modificaba la ecuación de Schrödinger y la convertía en otra más compleja, mediante el uso de «matrices» —lo que significaba que su ecuación describía, en realidad, una serie de cuatro ecuaciones emparejadas distintas— podría unificar de forma consistente la mecánica cuántica y la relatividad y, de este modo, en principio describir el comportamiento de sistemas donde los electrones se movían a velocidades muy superiores.

Pero surgió un problema. Dirac había formulado una ecuación que pretendía describir el comportamiento de los electrones en su interacción con los campos eléctricos y magnéticos. Pero su ecuación parecía requerir asimismo la existencia de partículas nuevas, iguales que los electrones, pero con la carga eléctrica contraria.

En aquella época, solo se conocía una partícula elemental en la naturaleza que tuviera una carga contraria a la del electrón: el protón. Pero los protones no se parecen en nada a los electrones. Para empezar ¡pesan 2.000 veces más!

Dirac quedó desconcertado. En un rapto de desesperación, sostuvo que en realidad las nuevas partículas eran protones pero que, de algún modo, al desplazarse por el espacio, las interacciones protónicas los hacían actuar

como si fueran más pesados. Otros físicos, como el propio Heisenberg, no tardaron mucho en demostrar que se trataba de una propuesta carente de sentido.

La naturaleza vino prontamente al rescate. Casi dos años después de que Dirac propusiera su ecuación y un año después de que se rindiera —y aceptara que, de estar su trabajo en lo cierto, debía existir una nueva partícula—, los investigadores que observaban los rayos cósmicos que bombardean la Tierra hallaron pruebas de la existencia de nuevas partículas idénticas a los electrones pero con la carga eléctrica contraria, a los que apodaron positrones.

Dirac estaba en lo cierto pero, unos años más tarde, reconoció que había desconfiado de su propia teoría y que, en realidad, ¡su ecuación era más inteligente que él mismo!

Hoy decimos que el positrón es la «antipartícula» del electrón, porque resulta que el descubrimiento de Dirac abarcaba mucho más de lo esperado. La misma física que exigía una antipartícula para que existiera un electrón requiere que exista una partícula de este tipo para prácticamente cada una de las partículas elementales de la naturaleza. Los protones, por ejemplo, tienen antiprotones. Incluso algunas partículas neutras, como los neutrones, tienen antipartículas. Cuando partículas y antipartículas coinciden, se aniquilan dando origen a una radiación pura.

Aunque todo esto pueda sonar a ciencia ficción (y, de hecho, la antimateria interpreta un importante papel en *Star Trek)*, en realidad estamos creando antipartículas todo el rato en nuestros grandes aceleradores de partículas de todo el mundo. Como, por lo demás, las antipartículas tienen las mismas propiedades que las partículas, un mundo hecho de antimateria se comportaría igual que el de materia, con antiamantes sentados en anticoches haciendo el amor bajo

una anti-Luna. El hecho de que vivamos en un universo compuesto de materia y no de antimateria, o en uno con las mismas cantidades de ambas, es un mero accidente de nuestras circunstancias que se debe, creemos, a factores bastante más profundos sobre los que volveré más adelante. A mí me gusta decir que, aunque la antimateria pueda parecer extraña, lo es en el sentido en que son extraños los neozelandeses. No es que sean raros en realidad; es que es muy raro encontrarse con alguno.

La existencia de las antipartículas hace del mundo observable un sitio mucho más interesante, pero también convierte al espacio vacío en algo mucho más complicado.

El legendario físico Richard Feynman fue el primero en presentar una interpretación intuitiva de por qué la relatividad requiere la existencia de antipartículas, lo cual también propició una demostración gráfica de que el espacio vacío no está tan vacío.

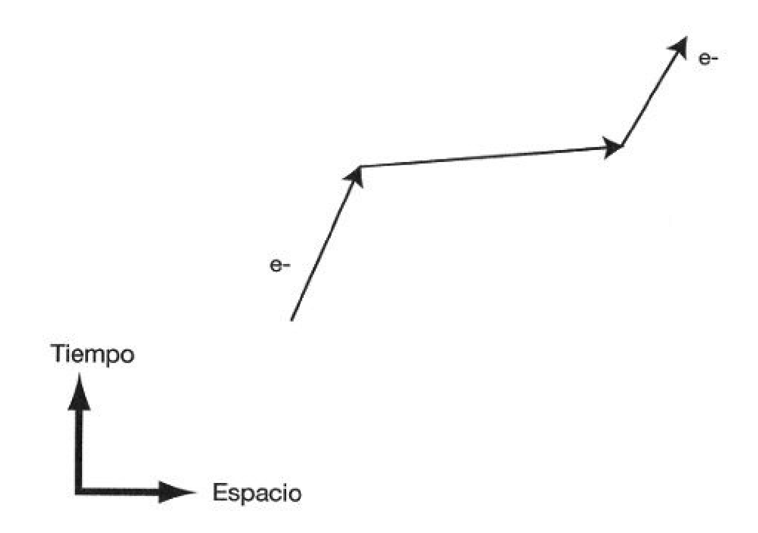
Feynman reconoció que la relatividad nos dice que los observadores que se mueven a distintas velocidades realizarán distintas mediciones de cantidades como la distancia y el tiempo. Por ejemplo, el tiempo parecerá ralentizarse para los objetos que se muevan muy rápido. Si, de algún modo, los objetos pudieran desplazarse más rápido que la luz, parecería que van hacia atrás en el tiempo; esta es una de las razones por las que se suele considerar que la velocidad de la luz es un límite para la velocidad cósmica.

Un principio clave de la mecánica cuántica, sin embargo, es el principio de incertidumbre de Heisenberg que, como he mencionado, afirma que, para ciertos pares de cantidades como la posición y la velocidad, es imposible determinar valores exactos para un sistema dado al mismo tiempo. Igualmente, si medimos un sistema dado solo

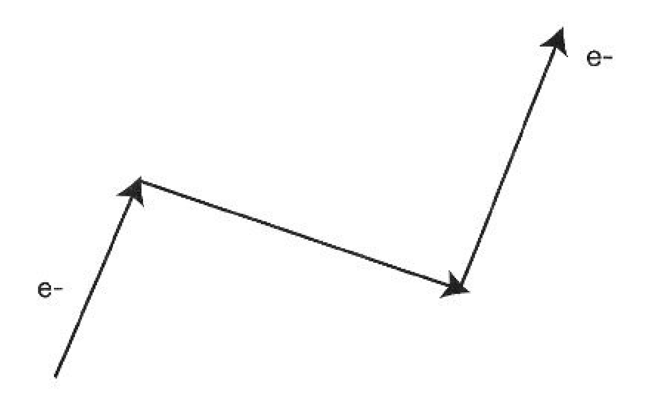
durante un intervalo temporal finito, fijo, no podemos establecer su energía total con exactitud.

Lo que implica todo esto es que, en periodos muy breves, tan breves que nos resulta imposible medir su velocidad con un alto grado de precisión, la mecánica cuántica brinda la posibilidad de que estas partículas actúen ¡como si se movieran más deprisa que la luz! Pero, si se mueven más rápido que la luz, Einstein nos dice que deben comportarse ¡como si fuesen hacia atrás en el tiempo!

Feynman tuvo el coraje de tomarse en serio esta posibilidad aparentemente disparatada y explorar sus consecuencias. Dibujó el siguiente diagrama del desplazamiento de un electrón, que acelera periódicamente durante su viaje hacia una velocidad superior a la de la luz.

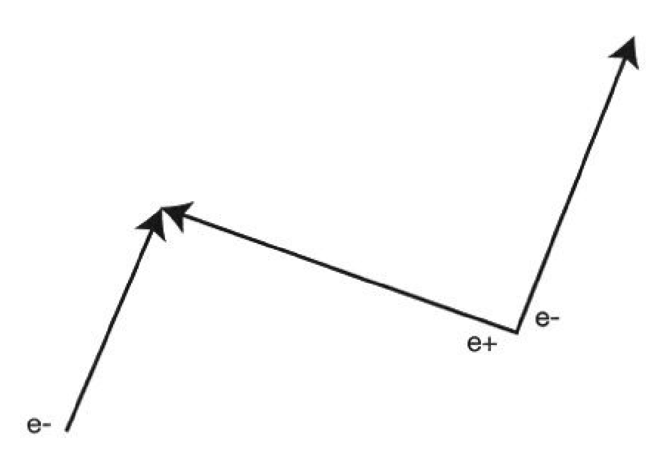


Reconoció que la relatividad nos diría que otro observador podría tomar otras mediciones distintas, con la apariencia que vemos en la página siguiente: un electrón que avanza en el tiempo, luego retrocede y luego avanza de nuevo.

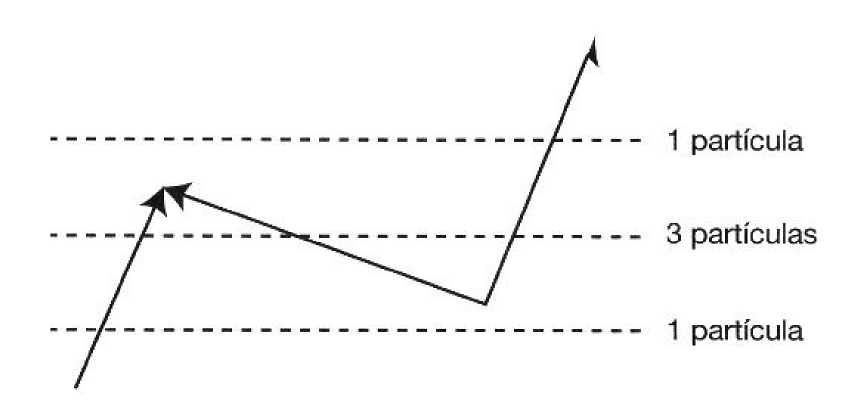


Sin embargo, ¡una carga negativa que retrocede en el tiempo es matemáticamente equivalente a una carga positiva que avanza en el tiempo! De este modo, la relatividad requeriría la existencia de partículas de carga positiva con la misma masa y otras propiedades que los electrones.

En este caso podemos reinterpretar el segundo dibujo de Feynman como sigue: un solo electrón se mueve y, a continuación, se crea de la nada y en otro punto espacial un par electrón-positrón, y después el positrón se encuentra con el primer electrón y ambos se aniquilan. Al final, nos queda un solo electrón en movimiento.



Si esto no le ha inquietado, piense entonces en lo siguiente: aunque haya empezado con una sola partícula y termine con una sola partícula, durante un breve espacio de tiempo hay tres partículas en movimiento:



En el breve periodo intermedio, al menos por un momento ¡algo se ha generado de la nada! Feynman describe con belleza esta aparente paradoja en su trabajo de 1949: «Una teoría de positrones», con una preciosa analogía bélica:

> Es como si un artillero que, a través de la mira de bombardeo de un avión en vuelo bajo, viera una sola carretera, de pronto viera tres carreteras; y solo cuando dos de ellas se unen y desaparecen de nuevo comprende que, sencillamente, ha pasado por encima de una larga curva prolongada en una sola carretera.

Siempre que el periodo temporal de la «curva prolongada» sea tan corto que no nos permita medir directamente todas las partículas, la mecánica cuántica y la relatividad implican que esta extraña situación no solo se acepta sino que se necesita. Las partículas que aparecen y desaparecen en escalas temporales demasiado cortas como

para medirlas se llaman partículas *virtuales*.

Ahora bien, inventar toda una nueva serie de partículas en el espacio vacío imposibles de medir no suena muy distinto de proponer que un gran número de ángeles están sentados sobre una cabeza de alfiler. Y la idea sería igual de estéril si estas partículas no tuvieran otros efectos mensurables. Pero, aunque no podamos observarlas de forma directa, resulta que sus efectos *indirectos* provocan la mayoría de características del universo que hoy experimentamos. Y no solo eso, sino que podemos calcular el impacto de estas partículas con mayor precisión que ningún otro cálculo científico.

Tomemos, por ejemplo, un átomo de hidrógeno; el sistema que Bohr trató de explicar desarrollando su teoría cuántica y que, más tarde, Schrödinger trató de describir derivando su famosa ecuación. La belleza de la mecánica cuántica radicaba en su capacidad de explicar los colores específicos de la luz emitida por el hidrógeno al calentarse; se explicaba sosteniendo que los electrones que orbitaban alrededor del protón solo podían existir en niveles de energía discretos y cuando saltaban entre niveles absorbían o emitían solo una serie fija de frecuencias de luz. La ecuación de Schrödinger nos permite calcular las frecuencias predichas y consigue una respuesta casi perfecta.

Pero solo casi.

Cuando se observó con más detenimiento el espectro del hidrógeno, se vio que era más complicado de lo que se había supuesto anteriormente: se apreciaron algunas pequeñas divisiones adicionales entre niveles, denominadas la «estructura fina» del espectro. Aunque estas divisiones se conocían desde la época de Bohr, y se sospechaba que quizá los efectos relativistas tenían algo que ver con ellas, hasta

disponer de una teoría plenamente relativista nadie pudo confirmar las sospechas. Afortunadamente, la ecuación de Dirac consiguió mejorar las predicciones, comparada con la de Schrödinger, y reprodujo la estructura general de las observaciones, incluida la estructura fina.

Hasta aquí todo iba bien, pero en abril de 1947, el investigador Willis Lamb de Estados Unidos y su alumno Robert C. Retherford llevaron a cabo un experimento cuya motivación, a primera vista, podría parecer del todo insuficiente. Se dieron cuenta de que disponían de la capacidad tecnológica para medir la estructura a nivel energético de los niveles de átomos de hidrógeno con una precisión de 1 parte por 100 millones.

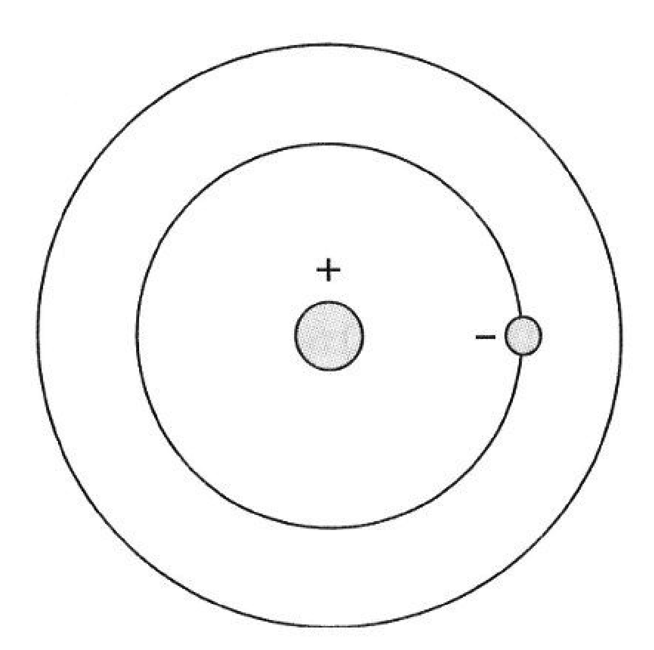
¿Por qué tomarse la molestia? Bueno, cada vez que los experimentalistas dan con un nuevo método para medir algo con una precisión netamente superior a la de antes, esta suele ser motivación suficiente para seguir adelante. Con frecuencia, en este proceso se revelan mundos completamente nuevos, como cuando en 1676 el científico holandés Antonie Philips van Leeuwenhoek se quedó mirando por primera vez una gota de agua, aparentemente vacía, a través del microscopio y descubrió que estaba repleta de vida. En este caso, sin embargo, la motivación de los investigadores era más inmediata. Hasta el momento del experimento de Lamb, la precisión experimental disponible no podía verificar la predicción de Dirac con detalle.

La ecuación de Dirac sí predecía la estructura general de las nuevas observaciones, pero la pregunta clave que Lamb quería responder era si la predecía con detalle. Esa era la única vía para evaluar realmente la teoría. Y cuando Lamb la puso a prueba, pareció dar una respuesta errónea, a un nivel de unas 100 partes por millar de millones, muy por

encima de la sensibilidad de su aparato.

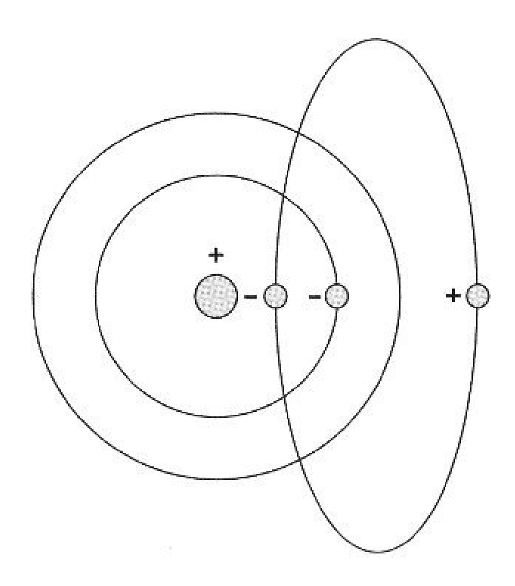
Un desacuerdo tan pequeño con el experimento quizá no parezca gran cosa, pero las predicciones de la interpretación más simple de la teoría de Dirac eran inequívocas, igual que el experimento, y diferían.

A lo largo de los años inmediatamente siguientes, las mentes teóricas más privilegiadas en el terreno de la física saltaron a la palestra y trataron de resolver la discrepancia. La respuesta llegó después de mucho trabajo y, pasada la tormenta, se vio que la ecuación de Dirac ofrece la respuesta correcta con precisión, pero solo si se tiene en cuenta el efecto de las partículas virtuales. Gráficamente, se puede entender del siguiente modo. Los átomos de hidrógeno suelen representarse en los libros de química más o menos de esta forma, con un protón en el centro y un electrón que orbita a su alrededor, saltando entre distintos niveles:



Sin embargo, cuando admitimos la posibilidad de que

pares de electrón-positrón puedan aparecer espontáneamente de la nada, para acto seguido aniquilarse mutuamente de nuevo, durante cualquier espacio de tiempo corto, el verdadero aspecto del átomo de hidrógeno es este:



A la derecha de la figura he dibujado ese par, que luego se aniquilará en lo alto. Al electrón virtual, con carga negativa, le gusta rondar cerca del protón, mientras que el positrón prefiere permanecer lejos. En cualquier caso, lo que este dibujo evidencia es que la verdadera distribución de la carga de un átomo de hidrógeno *no* se describe en cualquier instante dado simplemente con un electrón y un protón.

Asombrosamente, los físicos hemos aprendido (tras el esforzado trabajo de Feynman y los demás) que podemos utilizar la ecuación de Dirac para calcular con una precisión arbitrariamente elevada el impacto sobre el espectro de hidrógeno, de entre todas las posibles partículas virtuales que pudieran existir en sus proximidades de forma

intermitente. Y cuando lo hacemos, *damos con la mejor, con la más precisa predicción de toda la ciencia*. El resto de predicciones científicas palidecen a su lado. En astronomía, las observaciones más recientes de la radiación del fondo cósmico de microondas nos permiten establecer comparaciones con predicciones teóricas a un nivel de quizá 1 parte en 100.000, lo cual es asombroso. Sin embargo, usando la ecuación de Dirac, y la existencia predicha de las partículas virtuales, podemos calcular el valor de parámetros atómicos y compararlos con las observaciones y alcanzar una coincidencia espectacular: del nivel de cerca de 1 parte por millar de millones, ¡o incluso mejor!

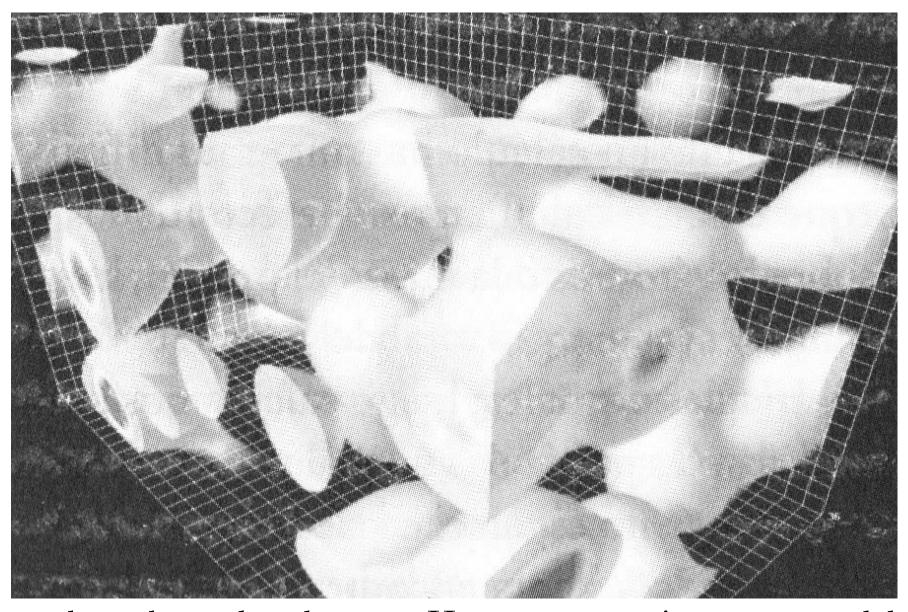
Las partículas virtuales, por tanto, existen.

Aunque la espectacular precisión de que disponemos en la física atómica es difícil de igualar, existe sin embargo otro lugar en el que las partículas virtuales interpretan un papel crucial que, de hecho, podría ser más relevante para el tema central de este libro. Resulta que son responsables de la mayoría de nuestra masa y de la de todo cuanto es visible en el universo.

Uno de los grandes éxitos de la década de 1970 en lo que a nuestra interpretación fundamental de la materia se refiere llegó junto con el descubrimiento de una teoría que describe con precisión las interacciones de los quarks, las partículas que componen los protones y los neutrones, que forman el grueso del material del que está hecho usted y todo cuanto usted puede ver. La matemática asociada con la teoría es compleja, y se necesitaron varias décadas para desarrollar técnicas que pudieran manejarla, en particular en el régimen en el que resultaba apreciable la interacción fuerte entre los quarks. Se emprendió un esfuerzo hercúleo, incluida la construcción de algunos de los más complejos

ordenadores con computación paralela, que utilizan simultáneamente decenas de miles de procesadores individuales, para intentar calcular las propiedades fundamentales de protones y neutrones, las partículas que medimos efectivamente.

Después de todo este trabajo, tenemos un buen retrato del aspecto real del interior de un protón. Puede contener 3 quarks, pero también muchas más cosas. En concreto, partículas virtuales que reflejan las partículas y campos que transmiten la fuerza fuerte entre quarks pasan a existir y dejan de



hacerlo todo el rato. He aquí una instantánea del verdadero aspecto de las cosas. Por supuesto, no es una fotografía real, sino una interpretación artística de las matemáticas que gobiernan la dinámica de los quarks y los campos que los unen. Las extrañas formas y las distintas tonalidades reflejan la fuerza de los campos que interactúan entre ellos y con los quarks del interior del protón al tiempo que las partículas virtuales pasan a existir y dejan de existir

de forma espontánea.

El protón está lleno, de forma intermitente, de estas partículas virtuales y, de hecho, cuando intentamos calcular en qué medida pueden contribuir a la masa del protón, descubrimos que los quarks por sí mismos aportan muy poco al total de la masa y que los campos creados por estas partículas son responsables de la mayor parte de la energía que entra en la energía en reposo del protón y, por tanto, en su masa en reposo. Lo mismo sucede con el neutrón, y puesto que todos estamos hechos de protones y neutrones, ¡lo mismo sucede con usted!

Ahora bien, si podemos calcular los efectos de las partículas virtuales en el espacio por lo demás vacío del interior de los átomos y de su alrededor, y podemos calcular los efectos de las partículas virtuales en el espacio por lo demás vacío del interior de los protones, ¿no vamos a ser capaces, pues, de calcular los efectos de las partículas virtuales en el espacio realmente vacío?

Bien, se trata de un cálculo bastante más difícil de hacer. Es así porque cuando calculamos el efecto de las partículas virtuales sobre los átomos o la masa del protón, lo que de verdad calculamos es la energía total del átomo o del protón *incluidas* las partículas virtuales; luego calculamos la energía total que aportarían las partículas virtuales sin estar presentes el átomo o el protón (esto es, en el espacio vacío) y *entonces* restamos ambas cantidades para encontrar el impacto neto sobre el átomo o el protón. Lo hacemos así porque resulta que cada una de estas dos energías es formalmente infinita cuando tratamos de resolver las ecuaciones que les corresponden, pero cuando restamos ambas cantidades, damos con una diferencia finita y, lo que es más, ¡con una que concuerda precisamente con el valor

medido!

No obstante, si queremos calcular el efecto de las partículas virtuales sobre el espacio vacío sin más, no disponemos de nada que restar, y la respuesta que obtenemos es, por tanto, infinito.

Ahora bien, infinito no es una cantidad agradable, al menos para los físicos e intentamos evitarla siempre que podemos. A todas luces, la energía del espacio vacío (o de cualquier otra cosa, para el caso) no puede ser físicamente infinita, por tanto hemos de inventar una forma de realizar los cálculos y obtener una respuesta finita.

El origen de la infinitud se describe sin problemas. Cuando pensamos en todas las posibles partículas virtuales que pueden aparecer, el principio de incertidumbre de Heisenberg (que afirma, les recuerdo, que la incertidumbre en la energía medida de un sistema es inversamente proporcional a la extensión de tiempo durante el cual se observa) implica que pueden aparecer espontáneamente de la nada partículas que portan aún más energía, siempre que luego desaparezcan en lapsos aún más breves. En principio, las partículas pueden por tanto ser portadoras de una energía casi infinita a condición de que desaparezcan en lapsos casi infinitesimalmente breves.

No obstante, las leyes de la física según las entendemos, solo funcionan para distancias y tiempos superiores a cierto valor, que se corresponde con la escala en la que han de tenerse en cuenta los efectos de la mecánica cuántica cuando tratamos de entender la gravedad (y sus efectos asociados sobre el espacio-tiempo). Hasta que dispongamos de una teoría de la «gravedad cuántica», como se la denomina, no podemos confiar en extrapolaciones que rebasen estos límites.

Por tanto, esperemos que la nueva física asociada con la gravedad cuántica aísle de algún modo los efectos de las partículas virtuales que viven menos que el «tiempo de Plank», según lo llamamos. Si entonces consideramos los efectos acumulativos exclusivamente de partículas virtuales de energías iguales o inferiores a las permitidas por este límite temporal, alcanzaremos un cálculo finito de la energía que las partículas virtuales aportan a la nada.

Pero tenemos un problema. ¡Resulta que este cálculo es aproximadamente 1.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.0(de veces superior a la energía asociada con toda la materia conocida en el universo, incluida la materia oscura!

Si el cálculo de los espaciamientos de niveles de la energía atómica que incluye las partículas virtuales es el mejor cómputo de toda la física, este cálculo de la energía del espacio vacío —120 órdenes de magnitud por encima de la energía de cualquier otra cosa en el universo— ¡es sin duda el peor! Si la energía del espacio vacío se acercase en algo a esta magnitud, la fuerza de repulsión inducida (recordemos que la energía del espacio vacío se corresponde con una constante cosmológica) sería lo suficientemente grande como para hacer volar la Tierra de hoy pero, lo que es más importante, en los primeros tiempos habría sido tan grande que todo lo que ahora vemos en nuestro universo se habría apartado tan deprisa en la primera fracción de segundo del Big Bang que jamás se habría formado ninguna estructura, ninguna estrella, ningún planeta y ninguna persona.

Este problema, al que con acierto se denomina el Problema de la Constante Cosmológica, ha estado sobre la mesa desde bastante antes de que yo me licenciase; lo

formuló por primera vez de forma explícita el cosmólogo ruso Yákov Zeldóvich hacia 1967. No se ha resuelto todavía y quizá sea el problema fundamental sin resolver más profundo en la física actual.

Pese a que llevemos más de cuarenta años sin tener la menor idea de cómo resolver el problema, los físicos teóricos sabíamos cuál debía ser la respuesta. Como el alumno del instituto que, según apunté, habría acertado que la energía del espacio vacío tenía que ser cero, nosotros también teníamos la sensación de que cuando se derivase la última teoría, esta explicaría cómo se anularían los efectos de las partículas virtuales, dejando el espacio vacío con una energía de, exactamente, cero. O nada. O mejor: Nada.

Nuestro razonamiento era mejor que el del alumno, o eso creímos. Teníamos que reducir la magnitud de la energía del espacio vacío desde el valor indiscutiblemente abrumador que tan ingenuamente habíamos sugerido hasta un valor consistente con los límites máximos permitidos por la observación. Para ello se necesitaba una forma de restar a un número positivo muy grande otro número positivo muy grande de modo que ambos cancelasen 120 decimales y quedase algún no-cero ¡en el decimal número 121! Pero no hay precedentes en la ciencia de una cancelación de dos grandes números con semejante precisión, dejando un resto minúsculo.

No obstante, el cero es fácil de conseguir. Las simetrías de la naturaleza suelen permitirnos demostrar que existen contribuciones precisamente iguales y opuestas que vienen de distintas partes del cálculo y se cancelan exactamente, dejando precisamente un resto de nada. O, de nuevo, Nada.

Por eso los teóricos podemos descansar tranquilamente y dormir por las noches. No sabíamos cómo llegar hasta allí,

pero estábamos seguros de cuál tenía que ser la respuesta final.

La naturaleza, sin embargo, tenía otra cosa en mente.

EL UNIVERSO DESENFRENADO

> Carece de sentido pensar ahora en el origen de la vida; también deberíamos pensar en el origen de la materia.
>
> CHARLES DARWIN

Lo que sostuvimos Michael Turner y yo en 1995 fue una herejía en grado superlativo. Basándonos en poco más que un prejuicio teórico, supusimos que el universo era plano. Tengo que hacer hincapié, una vez más, en que un universo tridimensional «plano» no es plano como una tortita bidimensional, sino más bien el espacio tridimensional que todos imaginamos por intuición, donde los rayos de luz viajan en línea recta. Tenemos que compararlo con los espacios tridimensionales curvos, mucho más difíciles de imaginar, en los que los rayos de luz, que siguen la curvatura subyacente del espacio, no viajan en línea recta. Turner y yo inferimos a continuación que todos los datos cosmológicos disponibles en aquel momento eran consistentes con un universo plano solo si cerca del 30% de la energía total residía en alguna forma de «materia oscura» que, según parecían indicar las observaciones, existía alrededor de las galaxias y los cúmulos; pero también inferimos algo mucho más extraño: que el 70% restante de la energía total en el universo no residía en ninguna forma de materia, sino más bien en el espacio vacío en sí.

Nuestra idea era una locura se mirara como se mirara. Para conseguir un valor de la constante cosmológica consistente con nuestra afirmación, el valor calculado para la cantidad descrita en el capítulo anterior debería haberse reducido de algún modo en 120 órdenes de magnitud y, aun así, no ser exactamente cero. Esto implicaría el ajuste más riguroso de cualquier cantidad física conocida en la

naturaleza, y no teníamos ni la menor idea de cómo lograrlo.

Esta fue una de las razones por las que, cuando daba conferencias acerca del dilema del universo plano en varias universidades, obtenía básicamente sonrisas y nada más. No creo que mucha gente se tomase nuestra propuesta en serio, y ni siquiera estoy seguro de que Turner y yo nos la creyésemos. Nuestro objetivo al provocar sorpresa con nuestra publicación era ilustrar, de forma gráfica, un hecho que empezábamos a comprender no solo nosotros, sino también varios de nuestros colegas teóricos por todo el mundo: algo parecía estar mal en la concepción por entonces «estándar» de nuestro universo, en la que se suponía que casi toda la energía requerida por la relatividad general para producir un universo plano hoy residía en la materia oscura exótica (con la mezcla aderezada por una pizca de bariones: nosotros, los terrícolas; estrellas, galaxias visibles…).

Hace poco me recordaba un colega que en los dos años posteriores a nuestra modesta contribución, esta solo apareció citada unas pocas veces en las publicaciones ulteriores y, según parece, todas las referencias salvo una o dos están en textos escritos por Turner o por mí mismo. Por mucha perplejidad que pueda despertar nuestro universo, el grueso de la comunidad científica creía que no podía ser tan disparatado como sugerimos Turner y yo.

La vía de escape más sencilla para salvar las contradicciones era la posibilidad de que el universo no fuera plano sino abierto (aquel en el que los rayos de luz que hoy son paralelos trazarían una curva divergente si siguiéramos su trayectoria hacia atrás. Esto fue, por descontado, antes de que las mediciones del fondo cósmico

de microondas dejasen claro que esta opción no era viable). Sin embargo, incluso esta posibilidad —que ya distaba de estar clara— tenía su propios problemas.

Si le preguntáramos a cualquier estudiante de física por la gravedad, nos diría quizá que es como un imán, es decir: que ejerce una atracción universal. Por supuesto, como tantas veces en ciencia, ahora nos damos cuenta de que hemos de abrir nuestros horizontes porque la naturaleza es más imaginativa que nosotros. Si aceptamos, por el momento, que la naturaleza atractiva de la gravedad implica que la expansión del universo ha ido perdiendo velocidad, recuérdese que obtenemos un límite superior para la edad del universo al suponer que la velocidad de una galaxia situada a cierta distancia de nuestra posición ha sido constante desde el Big Bang. Es así porque, si el universo se ha estado ralentizando, entonces hubo un tiempo en que la galaxia se alejaba de nosotros a mayor velocidad que ahora y, por lo tanto, habría tardado menos tiempo en alcanzar su posición actual que si siempre se hubiera desplazado a su velocidad de hoy. En un universo abierto, dominado por materia, la deceleración del universo sería más lenta que en un universo plano y, por tanto, la edad inferida del universo sería mayor que en el caso de un universo plano dominado por materia, para la misma tasa de expansión medida actualmente. De hecho, estaría mucho más cerca del valor que calculamos al suponer una tasa de expansión constante a lo largo del tiempo cósmico.

Recuérdese que una energía del espacio vacío distinta de cero produciría una constante cosmológica —como la repulsión gravitacional— que implicaría que la expansión del universo, por el contrario, se aceleraría a lo largo del tiempo cósmico; en consecuencia, anteriormente las galaxias

se habrían estado alejando más despacio que hoy. Esto implicaría que, en alcanzar su distancia actual, habrían tardado incluso más que con una expansión constante. De hecho, tomando una medida dada de la constante de Hubble hoy, la vida más prolongada posible de nuestro universo (unos 20.000 millones de años) se obtiene incluyendo la posibilidad de una constante cosmológica junto con la cantidad medida de materia visible y oscura, si tenemos libertad para ajustar su valor junto con la densidad de la materia en el universo de hoy.

En 1996 trabajé con Brian Chaboyer y con nuestros colaboradores Pierre Demarque en Yale y con el estudiante de posdoctorado Peter Kernan en la Case Western Reserve para poner un límite inferior a la edad de las estrellas más viejas de nuestra galaxia, que rondaría los 12.000 millones de años. Lo hicimos modelando la evolución de millones de estrellas distintas en ordenadores de alta velocidad y comparando sus brillos y colores con estrellas reales observadas en los cúmulos globulares de nuestra galaxia, que durante mucho tiempo se tuvieron entre los objetos más antiguos de la galaxia. Si admitimos que nuestra galaxia tardó alrededor de 1.000 millones de años en formarse, este límite inferior descartaba efectivamente un universo plano dominado por materia y favorecía otro con una constante cosmológica (uno de los factores que había pesado en las conclusiones de mi anterior trabajo con Turner), mientras que un universo abierto no tenía garantizada la viabilidad.

No obstante, para determinar las edades de las estrellas más antiguas nos basamos en observaciones que llevaban la técnica de entonces al límite de su *sensibilidad*. En 1997, nuevos datos observacionales nos obligaron a revisar nuestros cálculos a la baja en unos 2.000 millones de años,

lo cual nos llevó a un universo un tanto más joven. De este modo, la situación se hizo mucho más brumosa y las tres cosmologías volvieron a parecer viables otra vez, haciendo que muchos de nosotros regresásemos a la casilla de salida.

Todo esto cambió en 1998, coincidiendo con el año en el que el experimento BOOMERANG demostraba que el universo es plano.

Durante los 70 años transcurridos desde que Edwin Hubble midiera la tasa de expansión del universo, los astrónomos habían trabajado cada vez con más denuedo para precisar su valor. Recuérdese que en la década de 1990 descubrieron, por fin, una «candela estándar»; un objeto cuya luminosidad intrínseca los observadores creían poder determinar independientemente, de modo que, cuando medían su luminosidad aparente, podían inferir su distancia. Según parecía, la candela estándar era fiable y se la podía observar a lo largo y ancho de las profundidades del espacio y el tiempo.

Hay una clase de estrella explosiva denominada supernova del tipo Ia que recientemente se ha demostrado que exhibe una relación entre brillo y longevidad. Medir cuánto tiempo conserva el brillo una supernova del tipo Ia requirió, por primera vez, tener en cuenta los efectos de la dilatación temporal debidos a la expansión del universo, lo cual implica que el tiempo de vida medido para tal supernova es, de hecho, más prolongado que su vida real en su marco de reposo. Sin embargo, podríamos inferir el brillo absoluto y medir su brillo aparente con telescopios y, en última instancia, determinar cuánto dista de la galaxia huésped en la que había explotado la supernova. Medir al mismo tiempo el desplazamiento al rojo de la galaxia nos permitió determinar la velocidad. Combinar las dos cosas

nos permite medir, cada día con mayor precisión, la tasa de expansión del universo.

Como las supernovas son tan brillantes, no solo nos ofrecen una estupenda herramienta para medir la constante de Hubble sino que también permiten a los observadores mirar hacia atrás a distancias que representan una fracción significativa de la edad total del universo. Esto brindó una posibilidad nueva y emocionante, que para los observadores representó una cantera mucho más atractiva: medir cómo cambia la constante de Hubble a lo largo del tiempo cósmico.

Medir el cambio de una constante suena a oxímoron, y así sería salvo por el hecho de que los humanos vivimos unas vidas muy breves, al menos a escala cósmica. En una escala de tiempo humana, la tasa de expansión del universo es, en efecto, constante. Sin embargo, como acabo de describir, la tasa de expansión del universo cambiará a lo largo del tiempo cósmico debido a los efectos de la gravedad.

Los astrónomos pensaron que si podían medir la velocidad y la distancia de las supernovas situadas muy lejos —en el otro extremo del universo visible— entonces podrían medir la tasa a la que se ralentizaba la expansión del universo (puesto que todo el mundo suponía que el universo actuaba razonablemente, y que la fuerza gravitacional dominante en el universo era de atracción). Confiaban que esto, a su vez, revelaría si el universo era abierto, cerrado o plano porque la tasa de ralentización como función del tiempo es diferente en cada geometría.

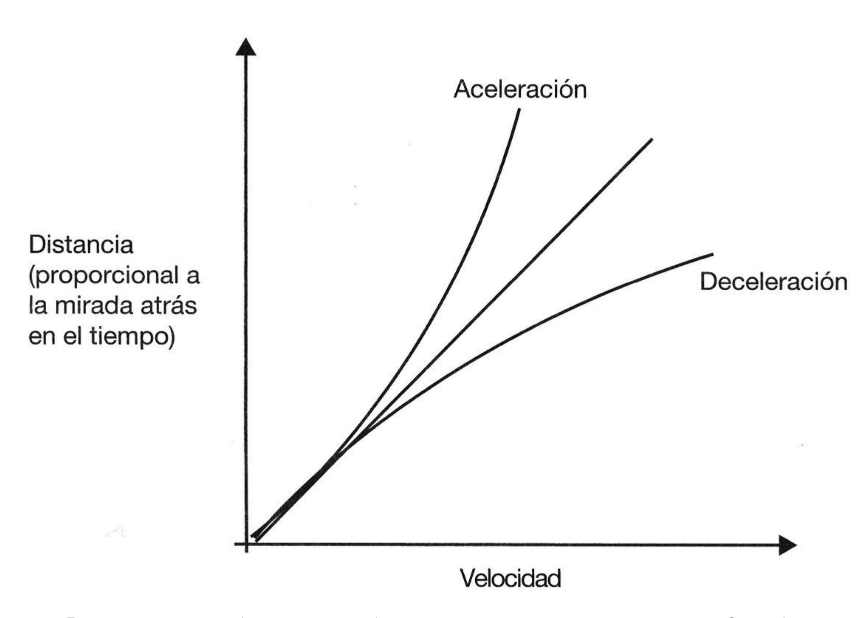
En 1996 estuve 6 semanas de visita en el laboratorio Lawrence de Berkeley, dando unas conferencias sobre cosmología y debatiendo varios proyectos científicos con mis colegas de allí. Di una charla sobre nuestra afirmación de

que el espacio vacío podría tener energía y luego Saul Perlmutter, un joven físico que trabajaba en la detección de supernovas distantes, se me acercó y me dijo: «¡Demostraremos que está equivocado!».

Saul se refería al siguiente aspecto de nuestra propuesta de un universo plano, el 70% de la energía del cual debía estar contenido en el espacio vacío. Recordemos que esa energía produciría una constante cosmológica conducente a una fuerza de repulsión que existiría entonces por todo el espacio y dominaría la expansión del universo, provocando que su expansión se *acelerase*, no se ralentizase.

Como he descrito, si la expansión del universo se fue acelerando a lo largo del tiempo cósmico, entonces hoy el universo sería más viejo de lo que, por el contrario, deduciríamos si la expansión se hubiera ido ralentizando. Esto implicaría, entonces, que al mirar atrás en el tiempo a galaxias con un desplazamiento al rojo dado, nos remontaríamos más atrás que en el caso contrario. A su vez, si se hubieran estado alejando de nosotros durante un periodo más prolongado, esto implicaría que la luz que llega de ellas se habría originado más lejos. A las supernovas situadas en galaxias con determinada medición de desplazamiento al rojo las veríamos brillar más débilmente que si la luz se originase más cerca.

Dicho de un modo esquemático, si midiéramos la velocidad frente a la distancia, la inclinación de la curva para las galaxias relativamente cercanas nos permitiría determinar la tasa de expansión de hoy y, entonces, en el caso de las supernovas distantes, el hecho de que la curva se orientara hacia arriba o hacia abajo, nos diría si el universo se estaba acelerando o ralentizando a lo largo del tiempo cósmico.



Dos años después de nuestro encuentro, Saul y sus colaboradores, parte de un equipo internacional denominado Proyecto Cosmológico Supernova, publicaron un artículo basándose en los primeros datos preliminares que sugerían efectivamente que nosotros nos equivocábamos. (En realidad, no afirmaba que Turner y yo estuviéramos en un error, porque ellos —como la mayoría de los demás observadores— apenas daban crédito a nuestra propuesta). Sus datos sugerían que la línea distancia *versus* desplazamiento al rojo se curvaba hacia abajo y, de este modo, que un límite superior para la energía del espacio vacío tenía que estar muy por debajo de lo que se habría necesitado para realizar una contribución significativa a la energía total de hoy.

No obstante, como ocurre a menudo, puede ser que los primeros datos que se obtienen no sean representativos del conjunto; ya sea por mala suerte estadística o porque pudieran afectar a los datos algunos errores sistemáticos inesperados que no se manifiestan hasta disponer de una

muestra mucho más amplia. Así ocurrió con los datos publicados por el Proyecto Cosmológico Supernova y, por lo tanto, las conclusiones fueron incorrectas.

Otro proyecto internacional de búsqueda de supernovas, llamado High-Z Supernova Search Team (Equipo de Búsqueda de Supernovas con Alto Desplazamiento al Rojo), dirigido por Brian Schmidt en el Observatorio de Monte Stromlo, en Australia, estaba desarrollando un programa con el mismo objetivo y empezaron a obtener resultados distintos. Hace poco Brian me dijo que, cuando obtuvieron su primera determinación significativa de una supernova con alto desplazamiento al rojo —que sugería un universo en aceleración con una significativa energía del vacío— se rechazó su petición de uso del telescopio y un periódico los informó de que debían estar equivocados porque el Proyecto Cosmológico Supernova ya había determinado que el universo es efectivamente plano y está dominado por materia.

La historia detallada de la competencia entre estos dos grupos sin duda se contará muchas veces, sobre todo después de que compartan el premio Nobel, como sin duda sucederá.[3]

No es este el lugar para preocuparnos por quién llegó primero. Baste decir que, a principios de 1998, el grupo de Schmidt publicó un artículo en el que demostraba que el universo parecía estar acelerando. Casi seis meses después, el grupo de Perlmutter anunció resultados similares y publicó otro artículo en el que confirmaba el resultado del grupo australiano, reconociendo en efecto su error anterior y dando más crédito a un universo dominado por la energía del espacio vacío o energía oscura, según el nombre más común hoy.

La rapidez con que la comunidad científica aceptó estos resultados —aunque exigían una revisión general de toda la concepción aceptada del universo— es un caso digno de estudio para la sociología científica. Casi de la noche a la mañana, pareció que los resultados se admitían universalmente, aunque como ha recalcado Carl Sagan «afirmaciones extraordinarias requieren pruebas extraordinarias». Y esta era una afirmación extraordinaria donde las haya.

Me llevé una gran sorpresa cuando, en diciembre de 1998, la revista *Science* escogió el descubrimiento de un universo en aceleración como «revelación científica del año» y publicó una llamativa portada con el dibujo de un Einstein pasmado.



No me llamó la atención porque creyera que el resultado no merecía esa cubierta. Al contrario. De ser cierto, era uno de los descubrimientos astronómicos más importantes de nuestro tiempo, pero en aquel momento los datos todavía no eran del todo concluyentes. Exigían un cambio tan grande en nuestro concepto del universo que me dio la impresión de que todos nosotros deberíamos estar más seguros de poder excluir definitivamente otras posibles causas de los efectos observados por los equipos antes de que todo el mundo se subiera al carro de la constante

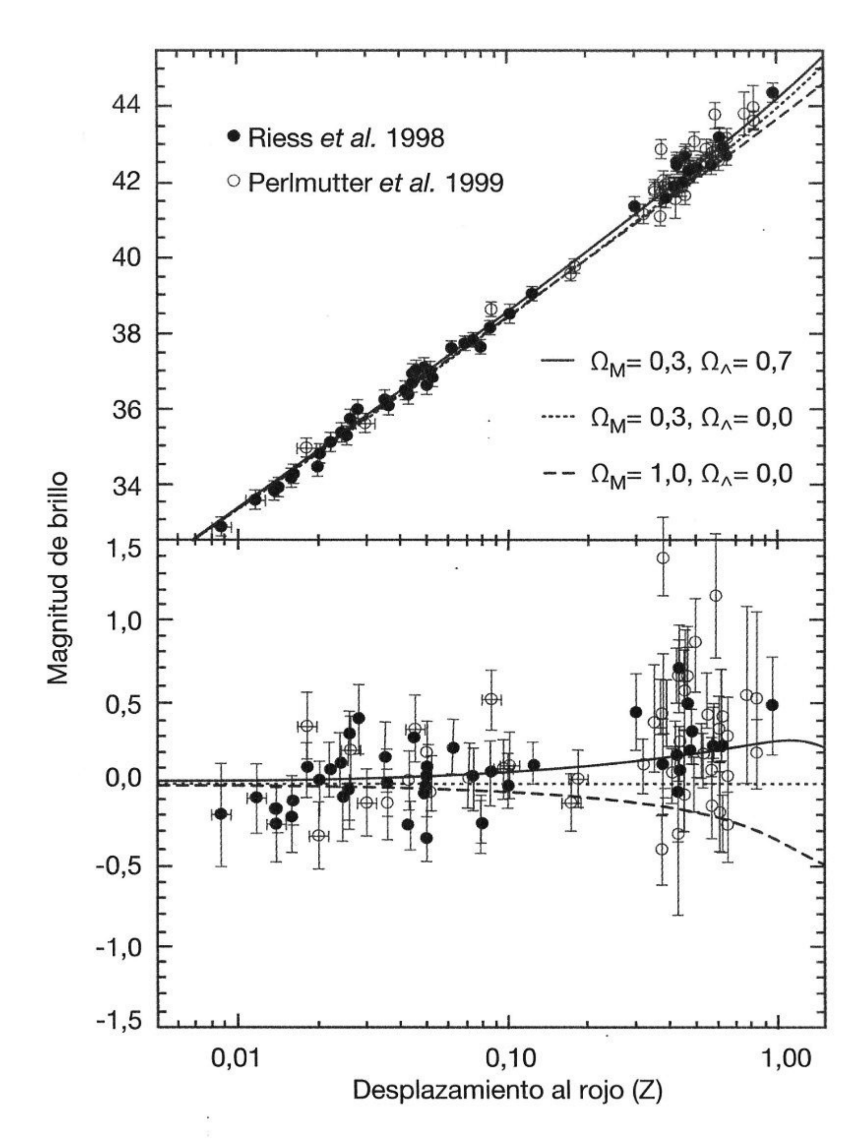
cosmológica. Tal como le dije a por lo menos un periodista en aquel momento: «la primera vez que no creí en una constante cosmológica fue cuando los observadores afirmaron haberla descubierto».

Esta reacción, algo jocosa, puede parecer extraña ya que, de un modo u otro, me había pasado unos diez años fomentando esa posibilidad. Como teórico, tengo la sensación de que es bueno conjeturar, sobre todo si con eso se abren nuevos caminos a la experimentación. Pero creo que, al examinar los datos reales, debemos ser tan conservadores como sea posible, quizá porque alcancé la madurez científica en una época en que tantas afirmaciones nuevas y excitantes, pero provisionales en mi propio campo de la física de partículas, resultaron ser espurias. Tales descubrimientos —que iban de una supuesta nueva quinta fuerza en la naturaleza al hallazgo de nuevas partículas elementales o la supuesta observación de que nuestro universo gira como un todo— han surgido con gran revuelo para luego desaparecer.

En aquel momento, la mayor preocupación relativa al supuesto descubrimiento de un universo en aceleración era que las supernovas lejanas podían aparecer más tenues de lo que se esperaría en otro caso, no por una expansión acelerada, sino simplemente porque o bien (a) *son* más tenues o (b) quizá algún polvo galáctico o intergaláctico presente en épocas tempranas las oscurece en parte.

En la década intermedia, ha resultado sin embargo que las pruebas de la aceleración se han vuelto abrumadoras, casi irrefutables. En primer lugar, se han medido muchas más supernovas con alto desplazamiento al rojo. A partir de estas mediciones, un análisis combinado de las supernovas de los dos grupos, realizado al cabo de un año de la

publicación original, arrojó el siguiente diagrama:



Como ayuda visual, para que sea más fácil ver si la curva de la distancia frente al desplazamiento al rojo se orienta hacia arriba o hacia abajo, los observadores han trazado una línea de puntos recta en la mitad superior del diagrama desde el extremo inferior izquierdo al superior derecho, que atraviesa los datos que representan las

supernovas cercanas.

La inclinación de esta línea nos indica la tasa de expansión actual. Luego, en la mitad inferior de la figura, se ha trazado la misma línea recta en horizontal, también como guía visual. Si el universo se estuviera ralentizando, como se esperaba en 1998, las supernovas distantes con un desplazamiento al rojo (z) cercano al 1 caerían por debajo de la línea recta. Pero, como se puede ver, la mayoría de ellas quedan por encima de la línea. Esto se debe a una de las siguientes dos razones:

1. Los datos son erróneos, o bien
2. la expansión del universo *se está* acelerando.

Si, por el momento, asumimos la segunda alternativa y preguntamos: «¿Cuánta energía tendríamos que poner en el espacio vacío para producir la aceleración observada?», damos con una respuesta extraordinaria. La curva continua, la que mejor encaja con los datos, se corresponde con un universo plano, donde el 30% de la energía está en la materia y el 70% en el espacio vacío. Esto es, sorprendentemente, justo lo que se necesitaba para que un universo plano fuera consistente con el hecho de que, en las galaxias y cúmulos y a su alrededor, solo existe el 30% de la masa requerida. Al parecer, se ha logrado una concordancia.

Sin embargo, como la afirmación de que el 99% del universo es invisible (el 1% de materia visible está enclavado en un mar de materia oscura rodeado de energía en el espacio vacío) encaja en la categoría de afirmación extraordinaria, deberíamos considerar seriamente la primera de las dos posibilidades que he mencionado antes; es decir, que los datos son erróneos. En la década

intermedia, todos los demás datos de la cosmología han seguido consolidando la imagen de concordancia general de un disparate: un universo plano en el que la energía dominante reside en el espacio vacío y en el que todo lo que podemos ver da cuenta de menos del 1% de la energía total y la materia que no podemos ver está formada en su mayoría de algunos tipos nuevos, aún desconocidos, de partículas elementales.

En primer lugar, los nuevos datos sobre la evolución estelar son mejores porque los nuevos satélites nos han proporcionado información sobre la abundancia de los elementos en las estrellas viejas. A partir de estos datos, mi colega Chaboyer y yo pudimos, en 2005, demostrar definitivamente que las incertidumbres en los cálculos de la edad del universo, que se basan en estos datos, eran lo suficientemente pequeñas para descartar las vidas de menos de unos 11.000 millones de años. Esto era incoherente con todo universo en el que el espacio vacío en sí no contuviera una cantidad significativa de energía. De nuevo, como seguimos sin tener la seguridad de que esta energía se deba a una constante cosmológica, ahora usamos el nombre más sencillo de «energía oscura», por analogía al apodo de «materia oscura» que domina las galaxias.

Este cálculo de la edad del universo mejoró mucho hacia 2006, cuando nuevas mediciones de precisión del fondo cósmico de microondas tomadas por la sonda WMAP permitieron a los observadores medir con exactitud el tiempo transcurrido desde el Big Bang. Ahora la edad del universo se puede calcular con precisión hasta la cuarta cifra significativa: ¡existe desde hace 13,72 miles de millones de años!

Jamás me imaginé que podría ver con mis propios ojos

tanta precisión. Pero ahora que ya tenemos esa cifra, podemos confirmar que no hay forma de que un universo con la tasa de expansión medida hoy pueda tener esta edad sin energía oscura, y en concreto, sin una energía oscura que se comporte esencialmente como lo haría la energía representada por una constante cosmológica. Dicho de otro modo, una energía que parece mantenerse constante a lo largo del tiempo.

En el siguiente avance científico, los observadores pudieron medir con rigor cómo la materia se había acumulado en forma de galaxias a lo largo del tiempo cósmico. El resultado depende de la tasa de expansión del universo, pues la fuerza de atracción que cohesiona las galaxias debe competir con la expansión cósmica que separa la materia. Cuanto mayor sea el valor de la energía del espacio vacío, antes llegará a dominar la energía del universo y antes la creciente tasa de expansión acabará por detener el colapso gravitacional de la materia a escalas aún mayores.

Al medir la acumulación gravitacional, por tanto, los observadores han sido capaces de confirmar, una vez más, que el único universo plano consistente con la estructura a gran escala observada en el universo es el que cuenta aproximadamente con un 70% de energía oscura y, una vez más, esa energía oscura se comporta más o menos como la energía representada por una constante cosmológica.

Independientemente de estas investigaciones indirectas de la historia de la expansión del universo, los observadores de las supernovas han realizado pruebas exhaustivas de posibilidades que podrían inducir a errores sistemáticos en sus análisis, incluida la posibilidad de un polvo incrementado a grandes distancias que hace que las

supernovas parezcan más tenues; y las han descartado una por una.

Una de las pruebas más importantes implicaba buscar atrás en el tiempo.

En una fase anterior de la historia del universo, cuando la región que se corresponde con la región observable en la actualidad era mucho menos extensa, la densidad de la materia era muy superior. No obstante, si refleja una constante cosmológica, o algo similar, la densidad de energía del espacio vacío sigue siendo la misma a lo largo del tiempo. Así, cuando el universo no había alcanzado ni la mitad de su dimensión actual, la densidad de energía de la materia habría superado a la densidad de energía del espacio vacío. Para todos los tiempos anteriores a este, la materia y no el espacio vacío habría producido la fuerza gravitacional dominante que actúa sobre la expansión. En consecuencia, el universo se habría estado ralentizando.

En la mecánica clásica existe un nombre para el punto en el que un sistema cambia su aceleración y pasa, en concreto, de ralentizarse a acelerarse. Se lo llama «sobreaceleración» o «tirón» (en inglés, *jerk)*. En 2003, organicé unas conferencias en mi universidad para examinar el futuro de la cosmología e invité a Adam Riess (uno de los miembros del equipo de detección de las supernovas de alto desplazamiento al rojo), quien me había dicho que tendría algo emocionante que contar en la reunión. Y así lo hizo. Al día siguiente, el *New York Times*, que cubría aquella reunión, publicó una foto de Adam acompañada del llamativo titular: «Descubierto tirón cósmico». Pero como *jerk*, en la lengua coloquial, además de referirse a un «tirón» también designa a un «memo» o «huevón»… entenderán que me guarde esa fotografía bien

guardada, para echarme unas risas de vez en cuando.

Trazar con detalle la historia de la expansión del universo que demostraba que pasó de un periodo de desaceleración a uno de aceleración, añadió un peso considerable a la afirmación de que las observaciones originales, que implicaban la existencia de energía oscura, eran de hecho correctas. Con todas las otras pruebas ahora disponibles es muy difícil imaginar que, si nos ceñimos a este panorama, estemos persiguiendo de algún modo simples fantasmas cósmicos. Nos guste o no, la energía oscura parece haber venido para quedarse, o al menos para quedarse hasta que de algún modo cambie.

El origen y la naturaleza de la energía oscura es, sin duda, el mayor misterio de la física fundamental de hoy. Apenas comprendemos cómo se originó y por qué tiene el valor que tiene. Por lo tanto, no tenemos la menor idea de por qué ha empezado a dominar la expansión del universo y solo en un momento relativamente reciente, hace unos 5.000 millones de años. ¿Podría no ser nada más que un accidente? Es lógico sospechar que su naturaleza está ligada de alguna forma básica al origen del universo. Y todas las señales apuntan a que también determinará el futuro del universo.

REGALOS A CAMBIO DE NADA

> El espacio es grande. Muy grande. Usted simplemente se negará a creer lo enorme, lo inmensa, lo pasmosamente grande que es. Quiero decir que quizá piense que es como un largo paseo por la calle, hasta la farmacia, pero eso no es nada comparado con el espacio.

DOUGLAS ADAMS, *Guía del autoestopista galáctico*.[4]

De dos, una, no está tan mal, supongo. Como los cosmólogos habíamos acertado al conjeturar que el universo es plano, no nos avergonzó tanto la asombrosa revelación de que el espacio vacío, en realidad, tiene energía (la suficiente, de hecho, para dominar la expansión del universo). La existencia de esta energía no era plausible, pero aún lo es menos que la energía no baste para convertir el universo en un lugar inhabitable. Porque si la energía del espacio vacío fuera tan grande como sugerían que debía ser los cálculos *a priori* que describí antes, la tasa de expansión habría sido de tal magnitud que cuanto vemos hoy en el universo habría sido empujado rápidamente más allá del horizonte. El universo se habría vuelto frío, oscuro y vacío mucho antes de que se hubieran podido formar las estrellas, nuestro Sol y nuestra Tierra.

De todas las razones para suponer que el universo era plano, quizá la más sencilla de comprender surgió del hecho de que era bien sabido que el universo era casi plano. Incluso en los primeros tiempos, antes de descubrir la materia oscura, la cantidad conocida de material visible en las galaxias y su alrededor quizá daba cuenta del 1% de la cantidad total de materia necesaria para obtener un universo plano.

Ahora bien, aunque un 1% pueda parecer poco, nuestro universo es muy viejo, tiene miles de millones de años. Si

suponemos que los efectos gravitacionales de la materia o la radiación dominan la expansión en marcha —como los físicos siempre pensamos que sucedía—, entonces, si el universo no es exactamente plano, a medida que se expande se aleja cada vez más de ser plano.

Si es abierto, la tasa de expansión continúa siendo más rápida de lo que sería en un universo plano, separando cada vez más la materia en comparación con lo que sucedería de otro modo, reduciendo su densidad neta y dando lugar con gran rapidez a una fracción infinitesimalmente pequeña de la densidad necesaria para obtener un universo plano.

Si es cerrado, entonces ralentiza la expansión más rápido y al final provoca que vuelva a colapsarse. Mientras tanto, la densidad primero decrece a una tasa más lenta que en un universo plano y luego, cuando el universo vuelve a colapsarse, empieza a crecer. Una vez más, la desviación de la densidad esperada para un universo plano aumenta con el tiempo.

El universo ha incrementado su tamaño en un factor de casi un billón desde que tenía un segundo de vida. Si en aquel primer momento la densidad del universo no era casi exactamente la que se esperaba de un universo plano, sino que era, digamos, solo el 10% de la adecuada para un universo plano en aquel momento, entonces hoy la densidad de nuestro universo diferiría de la de un universo plano en al menos un factor de un billón. Eso es mucho más que el mero factor de 1% que se sabía que separaba la densidad de la materia visible en el universo de la densidad de lo que produciría un universo plano hoy.

A este problema, que ya era bien conocido incluso en la década de 1970, se lo dio en llamar el Problema de la Planitud. Reflexionar sobre la geometría del universo es

como imaginar un lápiz que se sostiene en equilibrio sobre su propia punta encima de la mesa. El más ligero desequilibrio hacia cualquier parte y caerá de inmediato. Así sucede con un universo plano. La más ligera desviación de la planitud aumenta rápidamente. Así pues, ¿cómo puede estar hoy el universo tan cerca de ser plano si no era *exactamente* plano?

La respuesta es sencilla: ¡Hoy tiene que ser fundamentalmente plano!

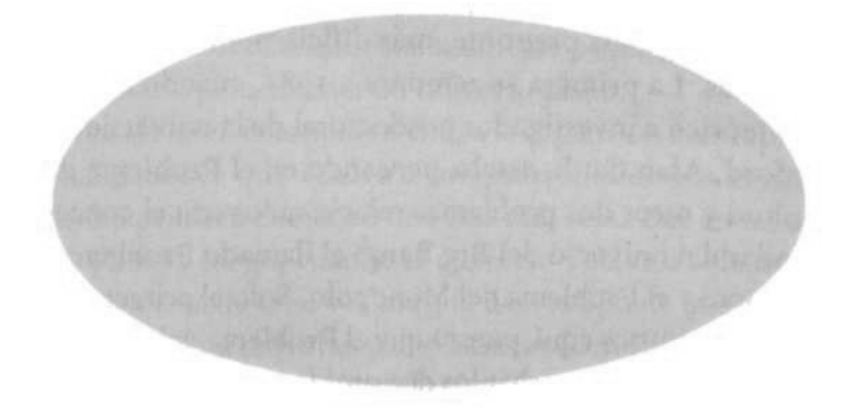
Lo cierto es que esta respuesta no es tan sencilla, porque plantea otra cuestión: las condiciones iniciales ¿cómo conspiraron para producir un universo plano?

A esta segunda pregunta, más difícil, podemos darle dos respuestas. La primera se remonta a 1981, cuando un joven físico teórico e investigador posdoctoral de la universidad de Stanford, Alan Guth, estaba pensando en el Problema de la Planitud y otros dos problemas relacionados con el concepto estándar del universo del Big Bang: el llamado Problema del Horizonte y el Problema del Monopolo. Solo el primero tiene que preocuparnos aquí, puesto que el Problema del Monopolo no hace más que exacerbar los dos problemas, el de la Planitud y el del Horizonte.

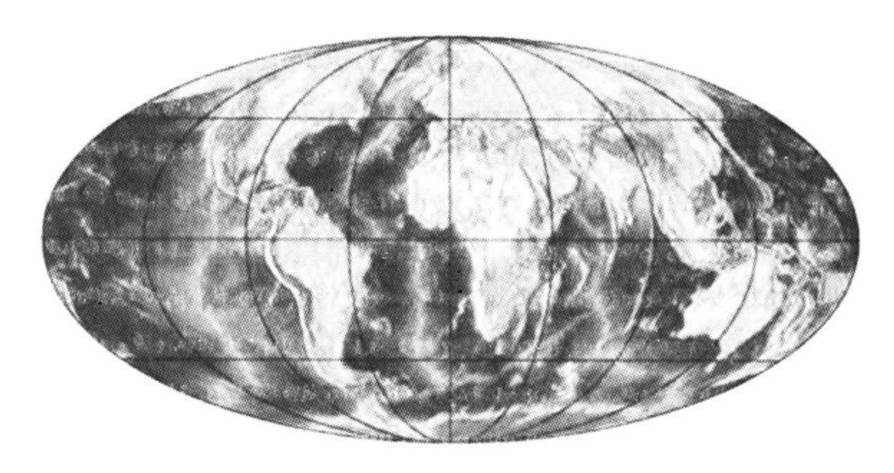
El Problema del Horizonte guarda relación con el hecho de que la radiación del fondo cósmico de microondas (RFCM) es extremadamente uniforme. Las pequeñas desviaciones de temperatura que he descrito anteriormente representaban variaciones de densidad en la materia y en la radiación cuando el universo tenía unos pocos centenares de miles de años, inferiores a 1 parte por 10.000 en comparación con la temperatura y densidad del fondo por otro lado uniformes. Por tanto, mientras yo estaba concentrado en las pequeñas desviaciones, existía una

pregunta más profunda y más urgente: ¿cómo consiguió el universo, en primer lugar, llegar a ser tan uniforme?

Después de todo, si en lugar de la anterior imagen de la RFCM (donde se reflejan en colores distintos variaciones de temperatura de unas pocas partes en 100.000), mostrara un mapa de temperaturas del cielo de microondas en una escala lineal (con las variaciones de tonos que representaran variaciones de temperatura de, digamos, ± 0,03 grados [kelvin] sobre la temperatura media del fondo de unos 2,72 grados sobre el cero absoluto, o una variación de 1 parte en 100 sobre la media) el mapa habría tenido este aspecto:



Compárese esta imagen, que no permite discernir nada sobre la estructura, con una proyección similar de la superficie de la Tierra, con una sensibilidad solo ligeramente superior donde las variaciones de color representan variaciones sobre el radio medio de cerca de 1 parte por 500, más o menos:



Por tanto, a grandes escalas ¡el universo es increíblemente uniforme!

¿Cómo puede ser? Bueno, podríamos admitir simplemente que, en los primeros tiempos, el universo temprano era caliente y denso y estaba en equilibrio térmico. Esto significa que cualquier punto caliente se habría enfriado y que los puntos fríos se habrían calentado hasta que el «caldo primordial» alcanzase la misma temperatura en todas partes.

No obstante, como ya señalé antes, cuando el universo tenía unos pocos cientos de miles de años, la luz solo podía haber viajado unos pocos cientos de miles de años luz, lo cual representa un porcentaje pequeño de lo que hoy es el total de universo observable (esta distancia anterior representaría tan solo un ángulo de cerca de 1 grado sobre un mapa de toda la superficie de la última dispersión del fondo cósmico de microondas según se la observa hoy). Puesto que Einstein nos dice que ninguna información puede propagarse más rápido que la luz, en el concepto de Big Bang estándar sencillamente no hay forma de que una parte de lo que hoy es el universo observable se hubiera visto afectada en aquella época por la existencia y la

temperatura de otras partes a unas escalas angulares de más de 1 grado aproximadamente. Por tanto, no hay forma de que el gas a estas escalas pudiera haber termalizado a tiempo de producir una temperatura tan uniforme en todas partes.

Guth, como físico de partículas, estaba pensando en procesos que podían haber ocurrido en el universo temprano y pudieran haber sido relevantes para comprender este problema, cuando ató cabos y se le ocurrió una idea absolutamente brillante. Si el universo, al enfriarse, experimentó alguna clase de transición de fase —como sucede, por ejemplo, cuando el agua se congela convirtiéndose en hielo o cuando una barra de hierro se magnetiza al enfriarse— entonces no solo se podría resolver el Problema del Horizonte sino también el de la Planitud (y, para el caso, el del Monopolo).

Si a usted le gusta beber cerveza realmente fría, quizá le haya pasado esto: saca un botellín de cerveza del frigorífico y, cuando lo abre y libera la presión contenida dentro, de repente la cerveza se congela por completo y, en ese tiempo, puede incluso llegar a romper parte de la botella. Esto sucede porque, a alta presión, el estado de menor energía preferido por la cerveza es el estado líquido, mientras que una vez se ha liberado la presión, el estado de menor energía preferido por la cerveza es el sólido. Durante la transición de fase, la energía puede liberarse porque el estado de menor energía en una fase puede tener una energía inferior que el estado de menor energía en la otra fase. Cuando esa energía se libera, se la conoce como «calor latente».

Guth se dio cuenta de que, a medida que el universo se enfriaba con la expansión del Big Bang, la configuración de

materia y radiación en el universo en expansión podría haber quedado atascada en algún estado metaestable durante un tiempo hasta que, finalmente, cuando el universo se enfrió más, esta configuración experimentó de repente una transición de fase al estado fundamental energéticamente preferido de materia y radiación. La energía almacenada en la configuración de «falso vacío» del universo antes de completarse la transición de fase —el «calor latente» del universo, si se prefiere— pudo afectar de forma radical a la expansión del universo durante el periodo previo a la transición.

La energía del falso vacío se comportaría igual que la representada por una constante cosmológica, porque actuaría como una energía que permea el espacio vacío. Esto provocaría que la expansión del universo en aquel momento se acelerase cada vez más. Al final, lo que se convertiría en nuestro universo observable empezaría a crecer más rápido que la velocidad de la luz. Esto está permitido en la relatividad general, aunque parece violar la relatividad especial de Einstein, que dice que nada puede viajar más deprisa que la velocidad de la luz. Pero aquí hay que analizar las palabras con el detenimiento de un abogado. La relatividad especial dice que nada puede viajar *por el espacio* más deprisa que la velocidad de la luz. Pero el *propio espacio* puede hacer lo que le venga en gana, al menos en la relatividad general. Y cuando el espacio se expande, puede trasladar objetos distantes, que están en reposo en el espacio donde se encuentran, alejándolos unos de otros a velocidades superlumínicas.

Resulta que el universo podía haberse expandido durante este periodo inflacionario en un factor de más de 10^{28}. Aunque se trata de una cantidad increíble, por

sorprendente que pueda parecer, podría haber sucedido en una fracción de segundo muy al principio del universo. En este caso, todo cuanto hay en nuestro universo observable estuvo contenido, una vez, antes de que tuviera lugar la inflación, en una región mucho menor que aquella a la que habríamos hecho que se remontara de no haberse producido la inflación; lo que es más importante, tan pequeña que habría habido tiempo suficiente entonces para que toda la región se termalizase y llegase exactamente a la misma temperatura.

La inflación posibilitó otra predicción relativamente genérica. Cuando un globo se va hinchando, la curvatura de su superficie va disminuyendo. Algo parecido ocurre en un universo cuyo tamaño se expande de forma exponencial, como puede suceder durante la inflación: impulsado por una energía de falso vacío grande y constante. De hecho, en el momento en que termina la inflación (resolviendo el Problema del Horizonte), la curvatura del universo (si de origen no es cero) se va acercando a un valor absurdamente pequeño de modo que, incluso hoy, el universo parece fundamentalmente plano cuando lo medimos con detenimiento.

La inflación es la única explicación viable en la actualidad, tanto para la homogeneidad como para la planitud del universo, basándonos en lo que podrían ser teorías microscópicas calculables y fundamentales de las partículas y sus interacciones. Pero más que esto, la inflación posibilita otra predicción que quizá sea aún más llamativa. Como ya he descrito, las leyes de la mecánica cuántica implican que, a escalas muy pequeñas y en periodos de tiempo muy breves, el espacio vacío puede parecer un hirviente y burbujeante caldo de partículas virtuales y de

campos cuya magnitud fluctúa violentamente. Estas «fluctuaciones cuánticas» pueden ser importantes para determinar el carácter de los protones y los átomos, pero en general son invisibles a escalas mayores, lo cual es una de las razones por las que nos parecen tan poco naturales.

No obstante, durante la inflación, estas fluctuaciones cuánticas pueden determinar cuándo las que, de otro modo, serían pequeñas regiones espaciales distintas terminan su periodo de expansión exponencial. Cuando las distintas regiones dejan de inflarse en momentos ligeramente (microscópicamente) distintos, la densidad de la materia y la radiación que resulta cuando la energía del falso vacío se libera como energía de calor en estas regiones distintas es ligeramente diferente en cada una de ellas.

El modelo de las fluctuaciones de densidad que se genera después de la inflación —que aparece, quisiera recalcar, de las fluctuaciones cuánticas en un espacio por lo demás vacío— resulta estar precisamente en concordancia con el modelo observado de los puntos fríos y puntos calientes a gran escala en la radiación del fondo cósmico de microondas. Aunque consistente no es probado hay, desde luego, una convicción creciente entre los cosmólogos de que, por usar el viejo dicho, si camina como un pato, parece un pato y grazna como un pato, probablemente sea un pato. Y si realmente la inflación es responsable de todas las pequeñas fluctuaciones en la densidad de la materia y la radiación que luego resultarían en el colapso gravitacional de la materia en galaxias y estrellas y planetas y personas, entonces se puede decir, verdaderamente, que todos nosotros estamos hoy aquí debido a las fluctuaciones cuánticas en lo que es esencialmente *nada*.

Se trata de algo tan extraordinario que quiero recalcarlo

una vez más. Las fluctuaciones cuánticas, que de otro modo habrían sido completamente invisibles, quedan congeladas por la inflación y emergen después como fluctuaciones de densidad ¡que producen todo cuanto podemos ver! Si todos somos polvo de estrellas, como he escrito, también es cierto —si la inflación tuvo lugar— que todos nosotros, literalmente, salimos de una nada cuántica.

Es algo tan asombrosamente poco intuitivo que puede llegar a parecer mágico. Pero hay al menos un aspecto de toda esta prestidigitación inflacionaria que podría parecer inquietante. ¿De dónde procede, en primer lugar, toda la energía? ¿Cómo puede una región microscópicamente pequeña terminar siendo hoy una región del tamaño de un universo, con materia y radiación suficientes en su interior para dar cuenta de cuanto podemos ver?

En un plano más general, podríamos preguntarnos: ¿cómo es que la densidad de energía puede permanecer constante en un universo en expansión con una constante cosmológica o energía del falso vacío? Al fin y al cabo, en un universo tal, el espacio se expande exponencialmente, de modo que si la densidad de energía sigue siendo la misma, la energía total dentro de cualquier región crecerá en la medida en que crece el volumen de la región. ¿Qué le ha sucedido a la conservación de la energía?

He aquí un ejemplo de lo que Guth designó como la «comida gratis» primordial: el universo sí que regala. Incluir los efectos de la gravedad al pensar sobre el universo permite que los objetos tengan —sorprendentemente— energía «negativa» tanto como «positiva». Esta faceta de la gravedad permite la posibilidad de que los elementos con energía positiva, como la materia y la radiación, puedan verse complementados por configuraciones de energía

negativa que simplemente equilibran la energía de la sustancia creada de energía positiva. Con este proceso, la gravedad puede empezar con un universo vacío, y terminar con uno lleno.

Quizá esto también huela a chamusquina, pero en realidad es una parte crucial de la auténtica fascinación que muchos de nosotros sentimos ante el universo plano. También es algo que quizá le suene de la física del instituto.

Imagine que lanza una pelota al aire. Por lo general, volverá a bajar. Ahora láncela más fuerte (suponiendo que no esté usted en un interior). La pelota llegará más arriba y pasará más tiempo en el aire antes de volver. Por último, si la lanza con la fuerza suficiente, no bajará. Escapará del campo gravitacional de la Tierra y seguirá adelante hacia el cosmos.

¿Cómo sabemos cuándo escapará la pelota? Usamos una sencilla cuestión de contabilidad energética. Un objeto que se mueve en el campo gravitacional de la Tierra tiene dos tipos de energía. Una es la energía del movimiento, la *energía cinética*, así llamada por la palabra griega para «movimiento». Esta energía, que depende de la velocidad del objeto, siempre es positiva. El otro componente de energía es la *energía potencial* (relacionada con el potencial para realizar trabajo) y suele ser negativa.

Sucede así porque definimos la energía gravitatoria total de un objeto en reposo, situado infinitamente lejos de cualquier otro objeto, como cero, lo cual parece razonable. La energía cinética es claramente cero y la energía potencial en este punto la definimos como cero, de modo que la energía gravitatoria total es cero.

Ahora bien, si el objeto no está infinitamente lejos de todos los demás objetos sino que se encuentra próximo a

uno, como la Tierra, empezará a caer hacia él debido a la atracción gravitacional. A medida que cae, aumenta la velocidad, y si choca con algo en el camino (pongamos por caso, su cabeza) puede realizar trabajo si, por ejemplo, se la abre. Cuanto más cerca esté de la superficie de la Tierra cuando se pone en marcha, menos trabajo puede realizar en el momento en que llega a la Tierra. De este modo, la energía potencial *disminuye* cuando nos acercamos a la Tierra. Pero si la energía potencial es cero cuando se encuentra infinitamente lejos de la Tierra, ha de ser cada vez más negativa cuanto más se acerque a ella porque su potencial para realizar trabajo disminuye cuanto más cerca está.

En la mecánica clásica, tal como la he definido aquí, la definición de energía potencial es arbitraria. Se podría haber fijado la energía potencial de un objeto en cero en la superficie de la Tierra, y entonces cuando el objeto estuviera infinitamente lejos la cifra sería elevada. Fijar la energía total en cero en el infinito tiene sentido en física, pero es, al menos en este punto del debate, una mera convención.

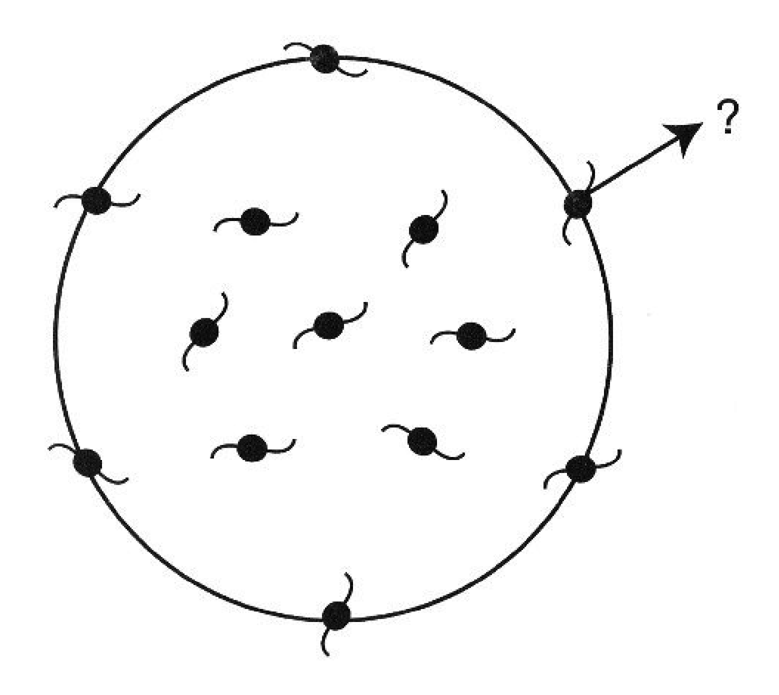
Con independencia de dónde coloque uno el punto cero de la energía potencial, lo maravilloso de los objetos sometidos solo a la fuerza de la gravedad es que la *suma* de sus energías cinética y potencial sigue siendo una constante. A medida que el objeto cae, la energía potencial se convierte en la energía cinética del movimiento y, a medida que vuelve a rebotar hacia arriba desde el suelo, la energía cinética vuelve a convertirse en potencial, etc.

Esto nos permite disponer de una maravillosa herramienta de contabilidad para determinar con qué rapidez hemos de lanzar algo al aire para que escape de la Tierra, puesto que si esto al final debe llegar infinitamente

lejos de la Tierra, su energía total ha de ser igual o mayor que cero. De este modo, solo tengo que asegurarme de que su energía gravitacional total en el momento en que deja mi mano es igual o mayor que cero. Como yo puedo controlar solo un aspecto de su energía total —a saber, la velocidad a la que abandona mi mano— todo lo que tengo que hacer es descubrir la velocidad mágica donde la energía cinética positiva de la pelota iguala a la energía potencial negativa que se debe a la atracción en la superficié terrestre. Tanto la energía cinética como la energía potencial de la pelota dependen precisamente, en la misma manera, de la masa de la pelota, lo cual se anula, por lo tanto, cuando estas dos cantidades se igualan; y descubrimos una única «velocidad de escape» para todos los objetos que parten de la superficie terrestre —unos 11,2 kilómetros por segundo—, en el momento en que la energía gravitatoria total del objeto es precisamente cero.

¿Qué ha tenido que ver todo esto con el universo en general y con la inflación en particular?, se preguntará usted. Bien, el mismo cálculo exacto que acabo de describir para una pelota que mi mano lanza desde la superficie terrestre es válido para cualquier objeto en nuestro universo en expansión.

Imaginemos una región esférica de nuestro universo centrada en nuestra posición (en la galaxia de la Vía Láctea), lo suficientemente grande como para englobar muchas galaxias al tiempo que suficientemente pequeña como para caber bien dentro de las mayores distancias hoy observables.



Si la región es lo suficientemente grande, pero no demasiado, las galaxias del borde de la región se irán alejando de nosotros uniformemente por la expansión de Hubble, pero sus velocidades serán muy inferiores a la de la luz. En este caso se aplican las leyes de Newton y podemos ignorar los efectos de la relatividad especial y general. En otras palabras, todo objeto está gobernado por una física idéntica a la que describe las pelotas que me acabo de imaginar intentando escapar de la Tierra.

Pensemos en la galaxia de la imagen superior, que se aparta del centro de la distribución según se muestra. Ahora, igual que con la pelota lanzada desde la tierra, podemos preguntarnos si la galaxia será capaz de escapar de la fuerza gravitacional de todas las demás galaxias del interior de la esfera. Y el cálculo que realizaríamos para determinar la respuesta es exactamente el mismo que el que realizamos para la pelota. Simplemente calculamos la

energía gravitacional total de la galaxia, basándonos en su movimiento hacia fuera (que le confiere energía positiva) y la fuerza gravitacional de sus vecinos (que le suministran una parte de energía negativa). Si su energía total es superior a cero, escapará al infinito, y si es menor que cero, se parará y caerá hacia el interior.

Ahora es posible afirmar, sorprendentemente, que somos capaces de reescribir la simple ecuación newtoniana para la energía gravitacional total de esta galaxia de un modo que reproduce *exactamente* la ecuación de Einstein de la relatividad general para un universo en expansión. Y el término que corresponde a la energía gravitacional total de la galaxia se convierte, en la relatividad general, en el término que describe la curvatura del universo.

Entonces, en ese punto, ¿qué encontramos? En un universo plano y *solo* en un universo plano, el promedio de la energía gravitatoria newtoniana total de cada objeto en movimiento con la expansión es *¡precisamente cero!*

Esto es lo que hace al universo plano tan especial. En un universo así, la energía positiva del movimiento se anula exactamente con la energía negativa de la atracción gravitacional.

Cuando empezamos a complicar las cosas al permitir que el espacio vacío tenga energía, la simple analogía newtoniana con la pelota que lanzamos al aire se vuelve incorrecta, pero la conclusión sigue siendo esencialmente la misma. En un universo plano, incluso en uno con una constante cosmológica pequeña, mientras la escala sea lo bastante pequeña como para que las velocidades estén muy por debajo de la velocidad de la luz, la energía gravitacional newtoniana asociada con cada objeto en el universo es cero.

De hecho, con una energía de vacío, la «comida gratis»

de Guth se vuelve aún más extrema. Como cada región del universo se expande a un tamaño cada vez mayor, cada vez está más cerca de ser plano, de modo que la energía gravitatoria newtoniana total de cuanto se obtiene después de la energía de vacío durante la inflación queda convertida en materia y la radiación se vuelve precisamente cero.

Pero podemos seguir preguntando ¿de dónde sale toda la energía para mantener la densidad de energía constante durante la inflación, cuando el universo se está expandiendo exponencialmente? Aquí entra en juego otro aspecto destacable de la relatividad general. La energía gravitacional de los objetos no es la única que puede ser negativa; también su «presión» relativista puede ser negativa.

La presión negativa es aún más difícil de imaginar que la energía negativa. El gas de un globo, por poner un ejemplo, ejerce una presión sobre las paredes de este. Con ello, si expande las paredes del globo, ejerce un trabajo sobre él. El trabajo que realiza provoca que el gas pierda energía y se enfríe. No obstante, resulta que la energía del espacio vacío es gravitacionalmente repulsiva justo porque provoca que el espacio vacío tenga una presión «negativa». Como resultado de esta presión negativa, el universo ejerce realmente un trabajo *sobre* el espacio vacío al tiempo que se expande. Este trabajo se dedica a mantener la densidad de energía constante del espacio mientras el universo se expande.

Por tanto, si las propiedades cuánticas de la materia y radiación acaban dotando de energía incluso a una región infinitesimalmente pequeña del espacio vacío en los primerísimos tiempos, esta región puede crecer hasta ser arbitrariamente grande y arbitrariamente plana. Cuando la inflación ha terminado, podemos encontrarnos con un universo lleno de sustancia (materia y radiación) y la energía

gravitacional newtoniana total de esta sustancia estará lo más próxima al cero que se puede imaginar.

Así que, tras la calma después de la tormenta y un siglo de intentos, hemos medido la curvatura del universo y hemos descubierto que es cero. Podrá comprender por qué tantos teóricos como yo pensamos que esto no solo es muy satisfactorio sino también de lo más sugerente.

Un universo de la Nada… realmente.

NUESTRO DEPRIMENTE FUTURO

> El futuro ya no es lo que era.
>
> YOGI BERRA

En cierto sentido, es tan llamativo como emocionante encontrarse en un universo dominado por la nada. Todas las estructuras que podemos ver, como las estrellas y las galaxias, fueron creadas por fluctuaciones cuánticas de la nada. Y el promedio total de energía gravitacional newtoniana de todos los objetos de nuestro universo es igual a nada. Disfrute usted de esta idea mientras pueda, si le apetece, porque, si todo esto es cierto, quizá vivamos en el peor de los universos posibles; al menos, en lo que atañe al futuro de la vida.

Recuérdese que, hace apenas un siglo, Einstein comenzaba a desarrollar su teoría general de la relatividad. El saber convencional, por entonces, sostenía que nuestro universo era estático y eterno. De hecho, el propio Einstein no solo ridiculizó a Lemaître por sugerir que se produjo un Big Bang, sino que además, para permitir que el universo fuera estático, se inventó una constante cosmológica.

Bien, un siglo más tarde, los científicos podemos exhibir con orgullo lo mucho que hemos descubierto: la expansión subyacente del universo, el fondo cósmico de microondas, la materia oscura y la energía oscura.

Pero ¿qué deparará el futuro?

Poesía… por decirlo de algún modo.

Recuérdese que, si se ha inferido que la expansión de nuestro universo está dominada por la energía de un espacio en apariencia vacío, es por el hecho de que la expansión se

está acelerando. Y, al igual que con la inflación (que se ha descrito en el último capítulo), nuestro universo observable está en el umbral de expandirse más rápido que la velocidad de la luz. Y, con el tiempo, debido a la expansión acelerada, las cosas solo empeorarán.

Esto significa que, cuanto más aguardemos, menos seremos capaces de ver. Las galaxias que podemos ver ahora, en algún día del futuro, se alejarán de nosotros a una velocidad superior a la de la luz, lo que supone que nos resultarán invisibles. La luz que emitirán no podrá contrarrestar la expansión del espacio y nunca nos alcanzará. Esas galaxias habrán desaparecido de nuestro horizonte.

La manera en que esto se desarrolla es algo distinta a lo que cabría imaginar. Las galaxias no desaparecen de pronto, ni su existencia se apaga tras un último destello en el cielo nocturno. Más bien, cuando su velocidad de recesión se acerca a la velocidad de la luz, la luz de estos objetos se desplaza cada vez más hacia el rojo. A la postre, toda su luz visible pasa a los infrarrojos, las microondas, las ondas de radio, etcétera, hasta que la longitud de onda lumínica que emiten termina siendo mayor que la dimensión del universo visible; en este punto, se tornan oficialmente invisibles.

Podemos calcular cuánto tiempo tardará este proceso. Como todas las galaxias de nuestro cúmulo local están unidas entre sí por la mutua atracción gravitatoria, no se alejan de la expansión de fondo del universo descubierto por Hubble. Las galaxias situadas inmediatamente fuera de nuestro grupo se hallan como a 1/5000 parte de la distancia al punto en el que la velocidad de recesión de los objetos se aproxima a la de la luz. Tardarán unos 150.000 millones de años —unas diez veces la edad actual del universo— en

llegar allí, en cuyo momento toda la luz de las estrellas del interior de las galaxias se habrá desplazado al rojo por un factor de aproximadamente 5.000. En unos 2 billones de años, su luz se habrá desplazado al rojo en una cantidad que hará que su longitud de onda sea igual a la dimensión del universo visible, y el resto del universo, literalmente, habrá desaparecido.

Dos billones de años puede parecer mucho tiempo… y en efecto lo es. Ahora bien, en un sentido cósmico, dista de ser una eternidad. Las estrellas de más larga vida entre las de la «secuencia principal» (que tienen la misma historia evolutiva que nuestro Sol) viven vidas mucho más largas que nuestro Sol y aún estarán brillando dentro de dos billones de años (por mucho que nuestro Sol vaya a extinguirse dentro de tan solo unos 5.000 millones de años). Y así, en el futuro remoto, podría haber civilizaciones en los planetas que orbiten en torno de esas estrellas, que obtendrán la energía de sus soles, con materiales orgánicos y agua. Y quizá en esos planetas haya astrónomos con telescopios. Pero cuando miren hacia el cosmos, prácticamente todo lo que nosotros podemos ver ahora, los 400.000 millones de galaxias que en la actualidad habitan nuestro universo visible, ¡habrán desaparecido!

He intentado utilizar este argumento en el Congreso, para obtener más fondos para la cosmología actual, ¡ahora que aún nos queda tiempo para observar todo lo que podamos! Pero para un congresista, dos años es mucho tiempo. Dos billones es algo inconcebible.

Sea como fuere, los astrónomos del futuro remoto experimentarían una gran sorpresa si llegaran a tener idea de lo que les faltaba; pero no ocurrirá así. No será así porque no solo habrá desaparecido el resto del universo

(como reconocimos hace unos pocos años mi colega Robert Scherrer, de Vanderbilt, y yo mismo), sino que también se habrán esfumado todas las pruebas que ahora nos indican que vivimos en un universo en expansión, que se inició en un Big Bang; e igualmente, todas las pruebas de la existencia de la energía oscura en el espacio vacío, que será la responsable de esa desaparición.

Si hace menos de un siglo el saber convencional aún sostenía que el universo era estático y eterno —con estrellas y planetas que nacían y morían pero un universo que, en la escala más amplia, perduraba—, en el futuro remoto, mucho después de que todo vestigio de nuestro planeta y nuestra civilización, probablemente, haya caído en la papelera de la historia, la ilusión que sirvió de soporte a nuestra civilización hasta 1930 volverá una vez más; pero en ese caso, de verdad.

Son tres los grandes pilares de la observación que nos han permitido dar validez empírica al Big Bang, de forma que, incluso si Einstein y Lemaître no hubieran vivido jamás, nos habríamos visto obligados a reconocer que el universo empezó en un estado muy caliente y de elevada densidad: uno, haber observado la expansión de Hubble; dos, haber observado el fondo cósmico de microondas; y tres, haber observado cómo coinciden la abundancia de elementos ligeros —hidrógeno, helio y litio— que hemos medido en el universo con las cantidades que se ha predicho se produjeron durante los breves primeros minutos de la historia del universo.

Empecemos con la expansión de Hubble. ¿Cómo sabemos que el universo se expande? Medimos la velocidad de recesión de objetos distantes como función de su distancia. Sin embargo, una vez que todos los objetos

visibles fuera de nuestro cúmulo local (al cual estamos unidos por la gravedad) han desaparecido de nuestro horizonte, ya no habrá ningún indicio de la expansión — ninguna estrella, galaxia, quásar o incluso gran nube de gas — que los observadores puedan rastrear. La expansión habrá sido tan eficiente que nos habrá privado de ver todos los objetos que en la actualidad se están alejando de nosotros.

Lo que es más, en una escala temporal de aproximadamente menos de un billón de años, todas las galaxias de nuestro grupo local se habrán fundido para formar alguna clase de gran metagalaxia. Los observadores del futuro remoto verán, más o menos, lo mismo que creían ver los observadores en 1915: una única galaxia que alojaba el planeta en el que vivían y la estrella que lo iluminaba, rodeada por un espacio que, por lo demás, era vasto, vacío y estático.

Recuérdese también que todas las pruebas de que el espacio vacío posee energía proceden de observar la tasa de aceleración de nuestro universo en expansión. Pero, de nuevo, sin indicios de tal expansión, resultará imposible observar la aceleración del universo que se expande. De hecho, en lo que es una extraña coincidencia, vivimos en la única era en la historia del universo en la que es probable que se pueda detectar la presencia de la energía oscura que permea el espacio vacío. Es cierto que esta era dura varios cientos de miles de millones de años; pero en un universo en eterna expansión, esto solo representa un simple abrir y cerrar de ojos cósmico.

Si suponemos que la energía del espacio vacío viene a ser constante —como ocurriría con una constante cosmológica—, entonces, en tiempos pretéritos, la densidad

de energía de la materia y la radiación habría superado, con mucho, la del espacio vacío. Es así porque, sencillamente, a medida que el universo se expande, la densidad de materia y radiación se reduce en paralelo a la expansión, puesto que la distancia entre partículas crece y hay un menor número de objetos en cada volumen. En tiempos pretéritos —digamos, hace más de 5.000/10.000 millones de años—, la densidad de materia y radiación habría sido muy superior a la actual. En esa época, y anteriormente, por lo tanto, el universo estuvo dominado por la materia y la radiación, con su consiguiente atracción gravitatoria. En este caso, la expansión del universo se habría ido ralentizando en esos tiempos pretéritos, y el impacto gravitacional de la energía del espacio vacío habría resultado inobservable.

Por la misma razón, en el futuro remoto, cuando el universo haya cumplido varios cientos de miles de millones de años de existencia, la densidad de materia y radiación se habrá reducido aún más; cabe calcular que la energía oscura tendrá una densidad de energía media que multiplicaría por mucho más de un billón la densidad de toda la demás materia y radiación del universo. En ese momento, gobernará por entero la dinámica gravitacional del universo en la gran escala. Sin embargo, en esa era tardía, la expansión acelerada se habrá tornado esencialmente inobservable. En este sentido, la energía del espacio vacío garantiza, por su propia naturaleza, que haya un tiempo finito durante el cual resulta observable. Curiosamente, vivimos en ese preciso instante cosmológico.

¿Qué podemos decir sobre el otro gran pilar del Big Bang, la radiación del fondo cósmico de microondas (RFCM), que nos proporciona directamente una imagen «de la infancia» del universo? Primero, a medida que el

universo vaya expandiéndose con una rapidez cada vez mayor en el futuro, la temperatura de la RFCM caerá. Cuando el universo actualmente observable sea unas cien veces mayor de lo que es ahora, la temperatura de la RFCM habrá caído por un factor de 100; y su intensidad (o la densidad de energía que almacena en su interior) habrá caído por un factor de 100 millones. En consecuencia, resultará unos 100 millones de veces más difícil de detectar que hoy.

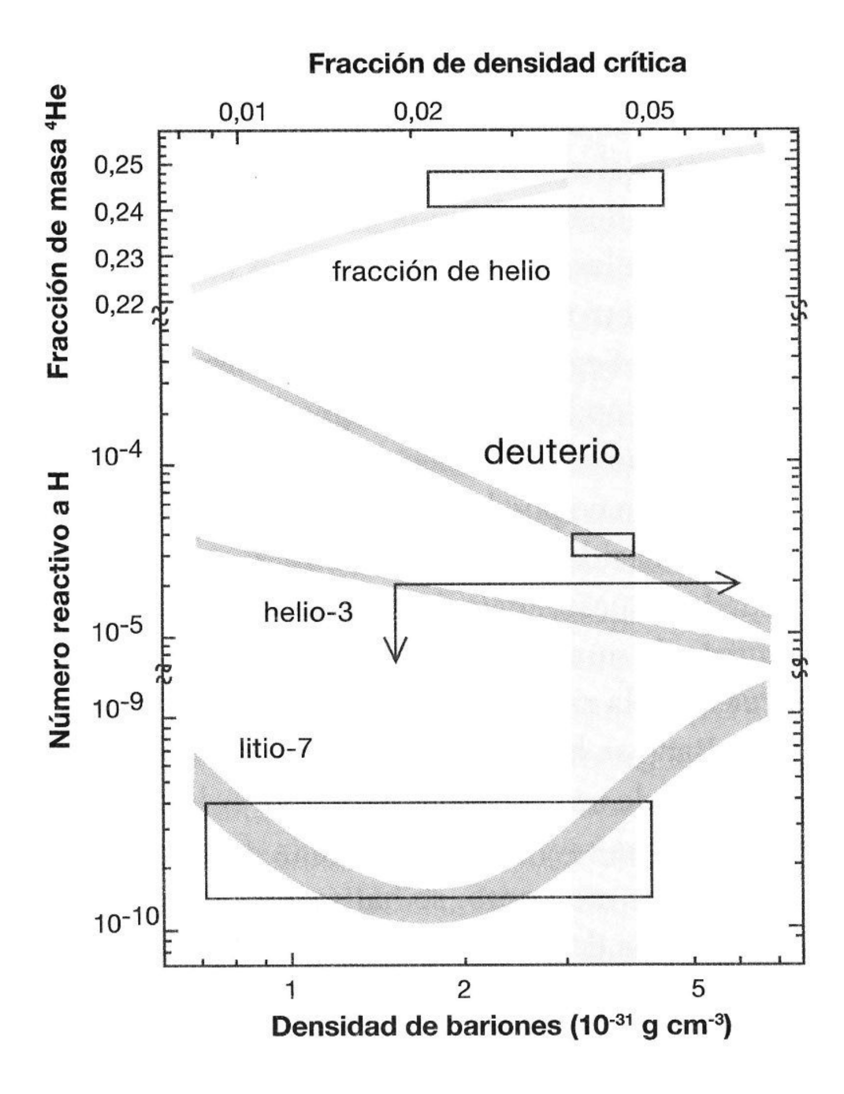
Sin embargo, después de todo, nosotros hemos sido capaces de detectar el fondo cósmico de microondas entre todo el resto de ruido electrónico de la Tierra; así pues, si imaginamos que los observadores del futuro remoto serán 100 millones de veces más inteligentes que los observadores con los que tenemos la suerte de contar hoy, entonces la esperanza no se ha perdido del todo. Por desgracia, resulta que incluso el observador más brillante que uno pudiera imaginar, provisto del instrumento más sensible que uno pudiera construir, seguiría teniendo, en lo esencial, una suerte nula en el futuro remoto. Es así porque en nuestra galaxia (o la metagalaxia que formará cuando nuestra galaxia se funda con las vecinas, empezando por Andrómeda, dentro de unos 5.000 millones de años) hay gas caliente entre las estrellas; y es un gas ionizado, es decir, que contiene electrones libres y, por lo tanto, se comporta como un plasma. Según he descrito anteriormente, esta clase de plasma resulta opaco a muchos tipos de radiación.

Existe algo llamado «frecuencia de plasma», por debajo de la cual la radiación no puede permear un plasma sin absorción. A partir de la densidad de electrones libres que se observa en la actualidad en nuestra galaxia, podemos calcular la frecuencia de plasma de nuestra galaxia; y, al

hacerlo así, hallamos que el grueso de la radiación del fondo cósmico de microondas del Big Bang se habrá alargado —cuando el universo alcance una edad de unas 50 veces la actual— hasta longitudes de onda tan largas —y en consecuencia, frecuencias tan bajas— que, en ese momento, se hallará por debajo de la frecuencia de plasma de nuestra futura (meta)galaxia. Después de esto, a la radiación le será esencialmente imposible entrar en nuestra (meta)galaxia, de forma que nadie la podrá observar, por muy tenaz que pudiera ser el observador. La RFCM también habrá desaparecido.

Fin, por tanto, de la expansión observada, del resplandor residual del Big Bang. Pero ¿qué se puede decir sobre la abundancia de elementos ligeros —hidrógeno, helio y litio— que también nos proporciona un rastro directo del Big Bang?

De hecho, según he contado en el capítulo I, cada vez que me encuentro con alguien que no da crédito al Big Bang, me gusta enseñarle la figura siguiente, que guardo en una tarjeta en mi cartera. Y entonces digo: «¡Ya lo ve! ¡Sí que hubo un Big Bang!».



La figura tiene una apariencia muy compleja, lo sé, pero en realidad muestra la abundancia predicha relativa de helio, deuterio, helio-3 y litio en comparación con el hidrógeno, a partir de nuestra comprensión actual del Big Bang. La curva superior, que asciende hacia la derecha, muestra la abundancia predicha de helio, el segundo elemento que más abunda en el universo, por peso, en comparación con el hidrógeno (el elemento más abundante). Las dos curvas siguientes, descendentes hacia la derecha,

representan las abundancias predichas de deuterio y helio-3, respectivamente, no por peso, sino por número de átomos en comparación con el hidrógeno. Por último, la curva inferior representa la abundancia predicha del siguiente elemento más ligero, el litio, de nuevo por número.

Las abundancias predichas se representan como funciones de la densidad total que se supone a la materia normal (compuesta de átomos) en el universo actual. Si variar esta cantidad no produjera una combinación de todas las abundancias de elementos predichas que encajan con nuestras observaciones, sería una prueba fuerte en contra de que se hubieran producido en un Big Bang caliente. Nótese que las abundancias predichas de estos elementos varían en casi 10 órdenes de magnitud.

Las cajas sin sombrear asociadas con cada curva representan el espectro permitido de la abundancia primordial que se calcula hoy para estos elementos a partir de observaciones de estrellas viejas y gas caliente dentro y fuera de nuestra galaxia.

La franja sombreada vertical representa la región en la que en efecto *coinciden* todas las predicciones y observaciones. Resulta difícil imaginar un apoyo más concreto que esta coincidencia entre las predicciones y las observaciones —en elementos, de nuevo, cuyas abundancias predichas varían en 10 órdenes de magnitud— para un Big Bang caliente e inicial en el que se crearon por vez primera todos los elementos ligeros.

Vale la pena hacer aún más hincapié en lo que implica esta coincidencia notable: solo en los primeros segundos de un Big Bang caliente, con una abundancia inicial de protones y neutrones que prácticamente equivaldría a la densidad de materia que se observa en las galaxias visibles

hoy, y una densidad de radiación que dejaría un resto que se correspondería precisamente con la intensidad observada de la radiación del fondo cósmico de microondas en la actualidad, ocurrirían reacciones nucleares capaces de producir la abundancia exacta de elementos ligeros, hidrógeno y deuterio, helio y litio, que hemos inferido que formaban los componentes básicos de las estrellas que ahora llenan el cielo nocturno.

Según lo habría podido decir un Einstein, solo un Dios muy malicioso (y por lo tanto, a su modo de ver, inconcebible) habría conspirado para crear un universo que nos indica, de una forma tan inequívoca, que se originó en un Big Bang… sin que este se produjera en realidad.

De hecho, cuando, en la década de 1960, se demostró por primera vez que la abundancia de helio que se infiere en el universo coincide a grandes rasgos con la abundancia de helio predicha para un Big Bang originario, este fue uno de los datos cruciales que ayudaron a que la idea del Big Bang se impusiera al modelo de universo estable, a la sazón muy popular, que defendían Fred Hoyle y sus colegas.

En el futuro remoto, sin embargo, la situación será muy distinta. Las estrellas queman hidrógeno y producen, entre otros, helio. En la época actual, solo cerca de un 15% del total de helio observado en el universo podría haber sido producido por las estrellas en el tiempo transcurrido desde el Big Bang; es, de nuevo, otra prueba clara de que, para tener lo que vemos, hizo falta un Big Bang. Pero en el futuro remoto, esto no será así, porque entonces habrán vivido y muerto muchas más generaciones de estrellas.

Cuando el universo haya cumplido un billón de años, por ejemplo, se habrá generado mucho más helio en las estrellas que el producido en el propio Big Bang. Es la

situación que podemos ver reflejada en la siguiente tabla:



Cuando el 60% del universo de la materia visible conste de helio, no habrá ninguna necesidad de producir helio primordial en un Big Bang caliente para que haya coincidencia con las observaciones.

Sin embargo, los observadores y teóricos de la supuesta civilización del futuro remoto podrán utilizar estos datos para inferir que el universo tuvo que haber tenido una edad finita. Como las estrellas queman hidrógeno que se convierte en helio, habrá un límite superior para el período de tiempo en que las estrellas pueden haber existido; de lo contrario, empeoraría aún más la relación entre el hidrógeno y el helio. Así, los científicos del futuro calcularán que el universo en el que viven no tendrá más de un billón

de años, aproximadamente. Pero no hallarán ningún rastro directo de que el principio requirió de un Big Bang, y no de cualquier otra clase de creación espontánea de nuestra futura (meta)galaxia única.

Recuérdese que Lemaître concluyó que hubo una Gran Explosión inicial sobre la mera base de una reflexión sobre la relatividad general de Einstein. Podemos suponer que toda civilización avanzada del futuro remoto descubrirá las leyes de la física, el electromagnetismo, la mecánica cuántica y la relatividad general. ¿Será entonces algún Lemaître del futuro remoto capaz de llegar a una conclusión similar?

Era inevitable que Lemaître llegara a la conclusión de que nuestro universo tuvo que empezar en un Big Bang; pero su punto de partida no será cierto para el universo observable en el futuro remoto. Un universo con materia que se dispersa de manera uniforme en todas las direcciones, que es isotrópico y homogéneo, no puede ser estático, por las razones que reconocieron Lemaître y, con el tiempo, Einstein. Sin embargo, las ecuaciones de Einstein tienen una solución perfectamente válida para un único sistema masivo rodeado por un espacio estático y vacío en lo demás. A fin de cuentas, si tal solución no existiera, entonces la relatividad general sería incapaz de describir objetos aislados tales como las estrellas de neutrones o, en última instancia, los agujeros negros.

Las grandes distribuciones de masa, como nuestra galaxia, son inestables, por lo que con el tiempo, nuestra (meta)galaxia se colapsará para formar un enorme agujero negro. Esto se describe con una solución estática de la ecuación de Einstein, conocida como la «solución de Schwarzschild». Pero el marco temporal en el que nuestra galaxia colapsará para formar un agujero negro masivo es

mucho más prolongado que el marco temporal para la desaparición del resto del universo. En consecuencia, a los científicos del futuro les parecerá natural imaginar que nuestra galaxia podría haber existido durante un billón de años en el espacio vacío sin un colapso significativo y sin necesidad de que la rodeara un universo en expansión.

Por descontado, es a todas luces muy dificultoso hacer conjeturas sobre el futuro. De hecho, estoy escribiendo estas palabras durante una estancia en el Foro Económico Mundial de Davos (Suiza), que está repleto de economistas que, una y otra vez, predicen el comportamiento de los mercados futuros y revisan sus predicciones cuando demuestran ser espantosamente falsas. Pero a mi juicio, toda predicción sobre el futuro remoto (e incluso el que no es tan remoto) de la ciencia y la tecnología resulta aún más esquemática que las que caracterizan a la «ciencia lúgubre». En realidad, cada vez que me preguntan por el futuro inmediato de la ciencia, o por cuál será el próximo hito en este campo, siempre respondo que, si lo supiera… ¡estaría trabajando en eso ahora mismo!

Así pues, me gusta pensar que el panorama que he presentado en este capítulo es similar al panorama del futuro que muestra el tercer fantasma del *Cuento de Navidad* de Dickens. Es el futuro según cabe la posibilidad de que sea. A fin de cuentas, como no tenemos ni idea de qué es la energía oscura que permea el espacio vacío, tampoco podemos estar seguros de que se comportará como la constante cosmológica de Einstein y se mantendrá constante. Si no lo hace, el futuro del universo podría ser muy distinto. Podría ser que la expansión no continuara acelerándose, sino que, con el tiempo, se ralentizara de modo que las galaxias distantes no desaparecieran. Otra

posibilidad es que haya algunas cantidades observables nuevas, que nosotros aún no podemos detectar y tal vez proporcionen a los astrónomos del futuro pruebas de que una vez hubo una Gran Explosión.

Ahora bien, según todo lo que sabemos hoy sobre el universo, el futuro que he esbozado es el más plausible; y resulta fascinante sopesar si la lógica, la razón y los datos empíricos podrían tal vez, de un modo u otro, llevar a los científicos del futuro a inferir la naturaleza que de veras subyace a nuestro universo, o si bien quedará para siempre oscurecida detrás del horizonte. Algún brillante científico del futuro que explore la naturaleza fundamental de las fuerzas y partículas podría tal vez extraer de ello una concepción teórica tal que sugiera que debe haberse producido una inflación; o que debe existir una energía en el espacio vacío que, además, explicaría por qué no hay galaxias en el horizonte visible. Pero no soy optimista al respecto.

Después de todo, la física es una ciencia empírica, impulsada por la observación y la experimentación. Si a partir de la observación no hubiéramos deducido la existencia de la energía oscura, no creo que ningún teórico hubiera tenido la valentía para sugerir hoy su existencia. Y aunque también cabe imaginar rastros provisionales que tal vez podrían sugerir que a un panorama de una galaxia única en un universo estático sin un Big Bang le falla algo —por ejemplo, que se observen abundancias de elementos que parezcan anómalas—, tiendo a pensar que, por la navaja de Ockham, se concluirá que la concepción correcta es la más simple y la observación anómala se atribuirá a algún efecto local.

Desde que Bob Scherrer y yo expusimos el desafío de

que los futuros científicos usarán datos y modelos falsables —el paradigma mismo de la buena ciencia—, pero que en el proceso acabarán obteniendo una imagen falsa del universo, muchos de nuestros colegas han intentado sugerir formas de verificar que el universo se está expandiendo de veras en el futuro remoto. Yo también puedo imaginar posibles experimentos. Pero creo que la motivación será insuficiente.

Por ejemplo, se necesitaría expulsar estrellas brillantes de nuestra galaxia, enviarlas al espacio, aguardar cerca de mil millones de años a que explotaran e intentar observar sus velocidades de recesión como una función de la distancia que alcanzan antes de explotar, lo que permitiría verificar si están obteniendo algún impulso adicional de una posible expansión del espacio. No es poco pedir, pero incluso si uno imagina que, de un modo u otro, esto se consiguiera, supongo que la Fundación Científica Nacional del futuro no financiará de hecho el experimento sin, por lo menos, algún otro motivo a favor de un universo en expansión. Y si, de algún modo, se diera una expulsión natural de estrellas de nuestra galaxia, que pudiéramos detectar en su trayecto hacia el horizonte, no veo claro que observar una aceleración anómala de algunos de estos objetos se interpretara con propuestas tan extrañas y atrevidas como la de un universo en expansión dominado por energía oscura.

Podemos considerarnos afortunados por vivir en la era presente. O, por decirlo en las palabras que escribimos Bob y yo en uno de los artículos: «Vivimos en un tiempo muy especial… ¡el único tiempo en el que la observación permite verificar que vivimos en un tiempo muy especial!».

El ánimo era un tanto jocoso, pero la cuestión da qué pensar: uno puede usar las mejores herramientas

observacionales y teóricas a la propia disposición y, sin embargo, concluir con una concepción totalmente falsa del universo en gran escala.

Debería señalar, no obstante, que aunque datos incompletos pueden llevar a conclusiones falsas, esto es muy distinto de la (falsa) imagen obtenida por aquellos que eligen hacer caso omiso de los datos empíricos e inventarse un panorama de Creación que, por lo demás, se contradiría con las pruebas reales (como hacen los defensores de la «Tierra joven», por ejemplo); o aquellos que, en su lugar, requieren la existencia de algo para lo cual no hay ninguna clase de prueba observable (como la inteligencia divina) para reconciliar su concepto de la creación con sus prejuicios apriorísticos; o, peor aún, los que se aferran a cuentos de hadas sobre la naturaleza, que se atreven a dar respuestas antes incluso de que se hayan podido plantear las preguntas. Al menos, los científicos del futuro basarán sus cálculos en las mejores pruebas de las que puedan disponer y reconocerán, igual que todos nosotros —como mínimo, los científicos—, que nuevos datos pueden hacer que cambiemos nuestro concepto subyacente de la realidad.

A este respecto, vale la pena añadir que quizá hay algo que se nos escapa, hoy mismo, y en cambio tal vez habríamos podido observarlo con solo haber vivido hace 10.000 millones de años o podríamos verlo si viviéramos dentro de 100.000 millones de años. No obstante, quiero hacer hincapié en que la idea del Big Bang está arraigada con tanta firmeza en datos de todas las áreas que, en sus rasgos generales, no hay lugar a pensar que sea inválida. Pero con nuevos datos, bien podría emerger fácilmente alguna interpretación nueva y matizada de los detalles concretos del pasado distante o el futuro remoto, o del

origen del Big Bang y su posible carácter único en el espacio. De hecho, confío en que ocurrirá así. Una lección que podemos extraer del posible final futuro de la vida y la inteligencia en el universo es que nuestras afirmaciones deben dar cabida a cierto grado de humildad cósmica… por difícil que sea tal cosa para un cosmólogo.

Sea como fuere, el escenario que acabo de describir posee cierta simetría poética, aunque no por ello es menos trágico. En ese futuro distante, los científicos llegarán a una concepción del universo en la que resonará la misma concepción que se tenía a principios del pasado siglo y que, por sí sola, terminó actuando como catalizador de investigaciones que llevaron a las modernas revoluciones de la cosmología. Así, la cosmología habrá vuelto al punto de partida. Por mi parte, me parece llamativo, aunque subraye lo que algunos quizá vean como futilidad última de nuestro breve momento bajo el sol.

Pase lo que pase, el problema fundamental que el posible final futuro de la cosmología pone de relieve es que solo contamos con un universo en el que hacer pruebas: el universo en el que vivimos. Aunque es necesario hacer pruebas si queremos tener alguna esperanza de comprender cómo surgió lo que ahora observamos, aun así estamos limitados tanto en lo que podemos medir como en nuestras interpretaciones de los datos.

Si existen muchos universos y si, de algún modo, pudiéramos someter a prueba más de uno, tal vez tendríamos más oportunidades de saber qué observaciones son verdaderamente relevantes y fundamentales y cuáles, por el contrario, han surgido solo como un accidente de nuestras circunstancias.

Como veremos a continuación, aunque la segunda

posibilidad es improbable, la primera no lo es; y los científicos avanzan nuevos experimentos y nuevas propuestas con las que reforzar nuestra comprensión de los rasgos inesperados y extraños de nuestro universo.

Antes de continuar, sin embargo, quizá vale la pena concluir con otra imagen, más literaria, del futuro probable que he presentado aquí; una imagen que tiene una relación especial con el tema de este libro. Procede de la respuesta que dio Christopher Hitchens al escenario que acabo de describir. En sus palabras: «Los que consideran extraordinario que vivamos en un universo de Algo, que esperen. ¡La Nada lleva un rumbo de colisión directa con nosotros!».

¿ACCIDENTE MAGNÍFICO?

> En el momento en que supones que hubo un creador y un plan, los humanos se convierten en objetos de un experimento cruel por el que nos crearon para estar enfermos y se nos ordenó que estuviéramos bien.
>
> CHRISTOPHER HITCHENS

Estamos programados para pensar que todo cuanto nos sucede es importante y está cargado de sentido. Soñamos que una amiga se va a romper el brazo, y al día siguiente descubrimos que se ha torcido el tobillo. ¡Vaya! ¡Es cómico! ¿Será clarividencia? El físico Richard Feynman solía gustar de acercarse a alguien y decirle: «¡No te creerás lo que me ha pasado hoy! ¡Es que no te lo vas a creer!». Y cuando la persona se interesaba por lo sucedido, Feynman respondía: «Absolutamente nada». Con esto, estaba sugiriendo que, cuando ocurre algo similar al sueño que he descrito, la gente tiende a darle importancia, pero olvida los incontables sueños absurdos que no habian predicho absolutamente nada. Al olvidar que, la mayor parte del tiempo, a lo largo del día no ocurre nada de importancia, interpretamos la naturaleza de la probabilidad cuando ocurre en efecto algo inusual: entre cualquier conjunto suficientemente amplio de acontecimientos, seguro que ocurrirá algo por simple casualidad.

¿Cómo se aplica esto a nuestro universo?

Hasta que se descubrió que, inexplicablemente, la energía del espacio vacío no solo no es cero, sino que toma un valor que es 120 órdenes de magnitud menor que el cálculo que describí basándome en ideas de la física de partículas, el saber convencional entre los físicos era que todo parámetro fundamental que medíamos en la naturaleza *es* significativo. Con esto quiero decir que, de

algún modo, sobre la base de principios fundamentales, con el tiempo seríamos capaces de comprender cuestiones como la de por qué la gravedad es tanto más débil que las otras fuerzas de la naturaleza, por qué el protón es 2.000 veces más pesado que el electrón y por qué hay tres familias de partículas elementales. Dicho con otras palabras: una vez comprendiéramos las leyes fundamentales que gobiernan las fuerzas de la naturaleza en sus escalas más pequeñas, todos estos misterios actuales se desvelarían como consecuencias naturales de estas leyes.

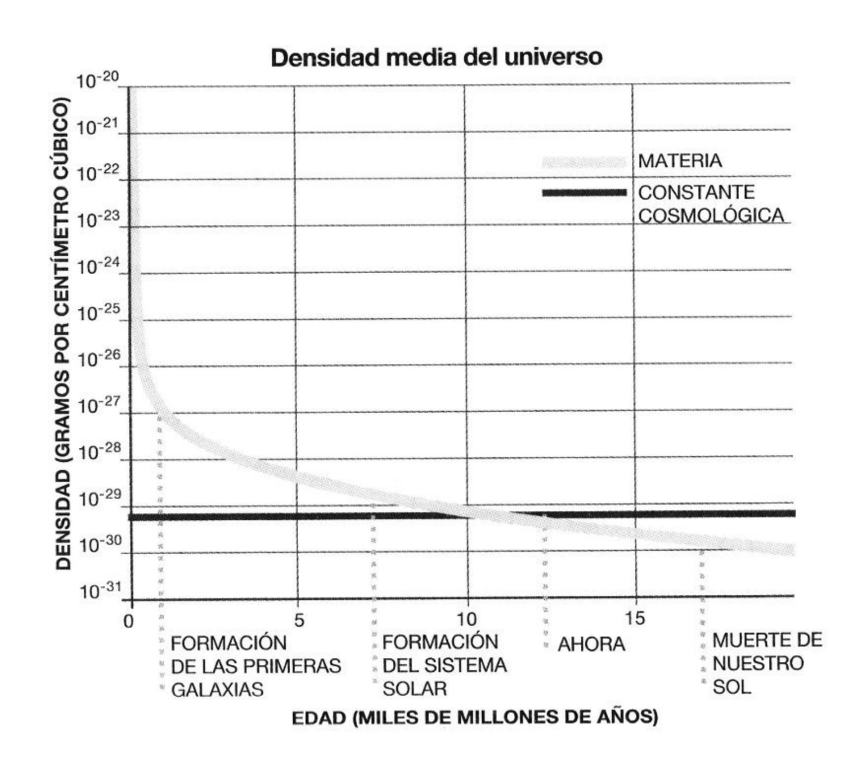
(Un argumento puramente religioso, por otro lado, podría llevar la importancia hasta el extremo al sugerir que toda constante fundamental es significativa porque Dios, según es de suponer, eligió que cada una tuviera el valor que tiene como parte de un plan divino para nuestro universo. En este caso, nada es accidental; pero, de la misma manera, nada se predice ni explica de verdad. Es un argumento por decreto, que no va a ningún sitio ni aporta nada útil al respecto de las leyes físicas que gobiernan el universo, salvo quizá el ofrecer consuelo al creyente).

Pero el descubrimiento de que el espacio vacío tiene energía favoreció que muchos físicos revisaran sus ideas al respecto de qué es necesario en la naturaleza y qué podría ser accidental. El catalizador de esta nueva *gestalt* tiene su origen en el argumento que he expuesto en el último capítulo: la energía oscura es mensurable ahora porque «ahora» es el único tiempo en la historia del universo en el que la energía del espacio vacío es comparable con la densidad de energía en la materia.

¿Por qué deberíamos vivir en un período tan «especial» de la historia del universo? De hecho, esto choca de frente con todo lo que ha caracterizado la ciencia desde

Copérnico. Hemos aprendido que la Tierra no es el centro del sistema solar y que el Sol es una estrella situada en los márgenes solitarios de una galaxia que es tan solo una más entre los 400.000 millones de galaxias del universo observable. Hemos llegado a aceptar el «principio copernicano» según el cual el lugar y el tiempo que ocupamos en el universo no tienen nada de especial.

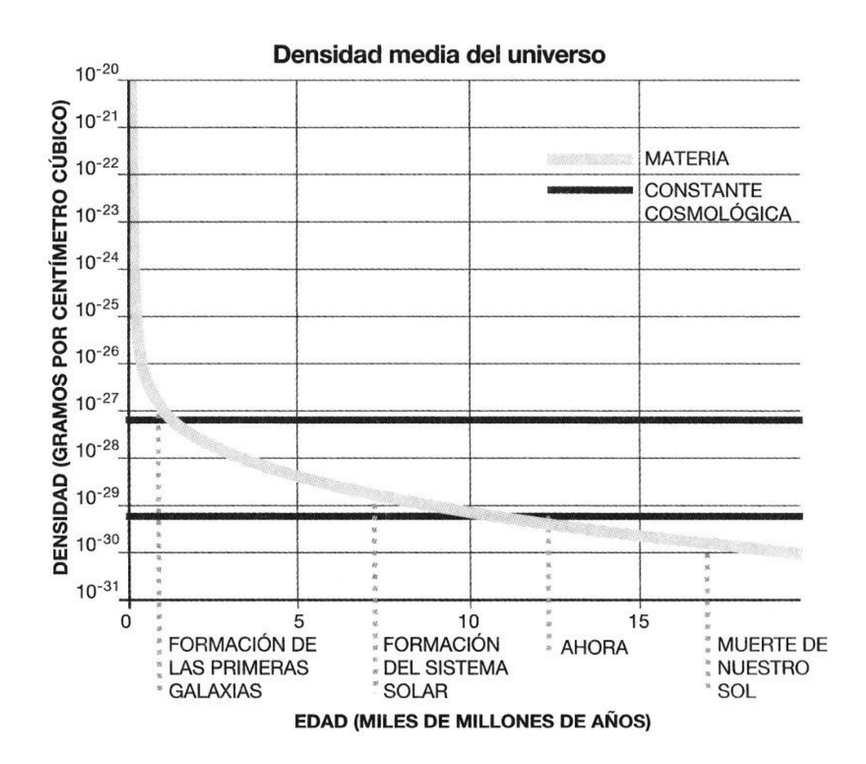
Pero como la energía del espacio vacío es como es, *sí* parece que vivimos en un tiempo especial. Lo mostrará claramente la siguiente ilustración de una «breve historia del tiempo»:



Las dos curvas representan la densidad de energía de toda la materia del universo y la densidad de energía del espacio vacío (suponiendo que sea una constante

cosmológica) como función del tiempo. Como se puede ver, la densidad de la materia cae a medida que el universo se expande (pues la distancia entre galaxias crece aún más y la materia, en consecuencia, se «diluye»), según cabría esperar que fuera. Sin embargo, la densidad de energía en el espacio vacío permanece constante, porque, cabría decir, ¡en el espacio vacío no hay qué diluir! (O, según he descrito de un modo algo menos jocoso, el universo sí actúa sobre un espacio vacío cuando se expande). Las dos curvas se cruzan relativamente cerca del tiempo actual, lo que explica la extraña coincidencia que he descrito.

Bien, ahora veamos qué pasaría si la energía del espacio vacío fuera, pongamos, 50 veces superior al valor que calculamos en la actualidad. Entonces, las dos curvas se cruzarían en un tiempo distinto, anterior, según se ve en la figura siguiente:



El tiempo en el que las dos curvas se cruzan en el caso del valor superior, aumentado, de la energía del espacio vacío es ahora el tiempo en el que se formaron las primeras galaxias, unos mil millones de años después del Big Bang. Pero recuérdese que la energía del espacio vacío ejerce una repulsión gravitatoria. Si hubiera llegado a dominar la energía del universo antes del tiempo de formación de las galaxias, la fuerza de repulsión debida a esta energía habría sido mayor —más pesada, literalmente— que la fuerza de atracción gravitacional normal, que hacía que la materia se agregara. ¡Y las galaxias no se habrían formado nunca!

Pero si las galaxias no se hubieran formado, tampoco se habrían formado las estrellas; y sin las estrellas, no se habrían formado los planetas; y sin los planetas, ¡no se habrían formado los astrónomos!

Así pues, en un universo cuya energía del espacio vacío fuera tan solo 50 veces más elevada que la que observamos ahora, al parecer hoy no habría por aquí nadie que pudiera intentar medir esa energía.

¿Acaso esto nos está diciendo algo? Poco después de que se descubriera que nuestro universo se está acelerando, el físico Steven Weinberg propuso, a partir de un argumento que había desarrollado más de una década atrás —antes de que se descubriese la energía oscura— que el «Problema de la Coincidencia» podría resolverse si quizá el valor de la constante cosmológica que medimos hoy se debiera a alguna clase de selección «antrópica». Es decir, si de algún modo hubiera muchos universos, y en cada universo el valor de la energía del espacio vacío adoptara un valor elegido al azar a partir de alguna distribución de probabilidades entre todas las energías posibles, entonces solo en aquellos universos en los que el valor no es tan distinto del que nosotros medimos se daría la posibilidad de que evolucionara la vida según la conocemos. Así, quizá nos hallamos en un universo con una energía diminuta en el espacio vacío porque no podríamos hallarnos en uno cuyo valor fuera muy superior. En otras palabras: ¡no es tan sorprendente comprobar que vivimos en un universo en el que podemos vivir!

Este argumento, sin embargo, solo tiene sentido, desde el punto de vista de la matemática, si hay una posibilidad de que hayan surgido muchos universos distintos. Hablar de muchos universos distintos puede sonar a oxímoron. A fin de cuentas, la noción tradicional del universo se ha considerado sinónima de «todo lo que existe».

En fechas más recientes, no obstante, el universo ha adquirido un sentido más simple y cabe pensar que más

razonable. Ahora es tradicional pensar que «nuestro» universo solo comprende la totalidad de lo que podemos ver ahora y podríamos llegar a ver alguna vez. Físicamente, por lo tanto, nuestro universo comprende todo lo que o bien pudo tener algún impacto sobre nosotros, o bien podrá tenerlo alguna vez.

En cuanto uno opta por esta definición de un universo, surge la posibilidad, al menos en principio, de que existan otros «universos»: regiones que siempre han estado y siempre estarán desconectadas causalmente de nosotros, como islas separadas de toda comunicación mutua por un océano de espacio.

Nuestro universo es tan vasto que, según ya he recalcado, algo que no resulta imposible tiene virtualmente todos los números de ocurrir en uno u otro lugar de su interior. Suceden constantemente acontecimientos extraños. Cabría preguntarse si el mismo principio se aplica a la posibilidad de que existan muchos universos, o un «multiverso», como se denomina hoy esta idea. Resulta que la situación teórica, en realidad, va más allá de la mera posibilidad. En la actual teoría de partículas, hay varias ideas centrales que impulsan gran parte de la actividad en este campo y parecen necesitar de un multiverso.

Quiero hacer hincapié en esto porque, en conversaciones con los que sienten la necesidad de un creador, la existencia de un multiverso se interpreta como un intento de escurrir el bulto por parte de los físicos, que se habrían quedado sin respuestas (o quizá sin preguntas). Tal vez termine dándose esta carencia, pero en la actualidad no ocurre así. Casi cualquier posibilidad lógica que podamos imaginar a la hora de ampliar las leyes de la física —según las conocemos, en la escala menor, hasta formar una teoría

más completa— sugiere que, en las grandes escalas, nuestro universo no es último.

En el fenómeno de la inflación hallamos la explicación primera, y quizá la mejor de todas. En la concepción inflacionaria, durante la fase en la que una energía descomunal domina temporalmente una región del universo, esta región empieza a expandirse exponencialmente. En algún punto, una pequeña región dentro de este «falso vacío» podría salir de la inflación cuando se diera una transición de fase dentro de la región y el campo de su interior se relaje hasta alcanzar su verdadero, e inferior, valor de energía; la expansión, dentro de esta región, dejará entonces de ser exponencial. Ahora bien, el espacio entre tales regiones continuará expandiéndose exponencialmente. En cualquier tiempo dado, entonces, salvo que la transición de fase se complete en todo el espacio, casi todo el espacio se halla dentro de una región en inflación. Y esta región inflacionaria separará las distancias que salgan primero de la inflación hasta distancias casi insondables. Es como la lava que vierte un volcán. Parte de la roca se enfriará y solidificará, pero estas rocas se alejarán mucho unas de otras porque flotan en un mar de magma líquido. La situación puede ser aún más extrema. En 1986, Andrei Linde, quien junto con Alan Guth ha sido uno de los principales arquitectos de la moderna teoría inflacionaria, defendió y exploró un escenario posiblemente más general. Es algo que también anticipó, en cierto sentido, otro ingenioso cosmólogo ruso que trabaja en Estados Unidos, Alex Vilenkin. Tanto Linde como Vilenkin muestran la confianza en sí mismos que uno encuentra en los grandes físicos rusos, aunque la historia de uno y otro es muy distinta. Linde prosperó en el viejo *establishment* de la física soviética, antes de emigrar a Estados

Unidos tras la caída de la Unión Soviética. Impetuoso, brillante y divertido, entre tanto ha seguido dominando buena parte de la cosmología relativa a la teoría de partículas. En cambio, Vilenkin emigró mucho antes, antes de doctorarse en física, y en Estados Unidos compaginó los estudios con varios puestos de trabajo (incluso como vigilante nocturno). Y aunque siempre tuvo interés en la cosmología, por accidente se inscribió en un doctorado equivocado y terminó realizando una tesis en el campo de la física de la materia condensada (física de los materiales). Luego halló trabajo como investigador posdoctoral en la Universidad Case Western Reserve, donde yo ocupé una cátedra, más adelante. Durante este período, pidió a su supervisor, Philip Taylor, que le autorizara a destinar varios días semanales a estudios cosmológicos, en paralelo a los proyectos que tenía asignados. Pese a esta dedicación parcial, Philip me comentó, tiempo después, que Alex fue el posdoctorado más productivo que había tenido nunca.

En cualquier caso, lo que Linde reconoció es que, mientras que durante la inflación las fluctuaciones cuánticas pueden, a menudo, reducir la energía del campo que impulsa la inflación hasta su estado más bajo y, con ello, ofrecer una salida elegante, siempre existe la posibilidad de que, en algunas regiones, las fluctuaciones cuánticas impulsen al campo hacia energías aún mayores y, por lo tanto, lejos de los valores donde la inflación terminará; de este modo, la inflación proseguirá sin mella. Como esta clase de regiones se expandirán durante períodos de tiempo más largos, será mucho más el espacio que experimenta la inflación que al contrario. Dentro de estas regiones, las fluctuaciones cuánticas, de nuevo, impulsarán a algunas regiones a salir de la inflación y, con ello, a dejar de expandirse exponencialmente; pero, una vez más, habrá

regiones en las que las fluctuaciones cuánticas harán que la inflación persista aún más tiempo, etcétera.

Este panorama, que Linde apodó «inflación caótica», recuerda en efecto a algunos sistemas caóticos de la Tierra, que conocemos bien. Pensemos en unos copos de avena en ebullición, por ejemplo. En cualquier momento, una burbuja de gas puede estallar en la superficie, como reflejo de regiones en las que el líquido, a temperatura elevada, completa una transición de fase para formar vapor. Pero entre las burbujas, la avena bulle y fluye. En la gran escala, hay regularidad: siempre hay burbujas que estallan en un lugar u otro; pero localmente, las cosas son muy distintas, según el punto al que miremos. Lo mismo ocurriría en un universo en estado de inflación caótica. Si coincidiera que uno se hallara situado en una «burbuja» en auténtico estado de reposo, que hubiera dejado de inflarse, el universo nos parecería muy distinto del vasto espacio que lo rodearía y aún estaría inflándose.

En esta concepción, la inflación es eterna. Algunas regiones —de hecho, la mayor parte del espacio— seguirán inflándose para siempre. Las regiones que salgan de la inflación se convertirán en universos separados, causalmente desconectados. Quiero hacer hincapié en que, si la inflación es eterna es inevitable que exista un universo; y la inflación eterna es, con mucho, la posibilidad más probable en la mayoría (si no en todos) de los escenarios de inflación. Según lo expresó Linde en su artículo de 1986:

En lugar de la vieja pregunta de por qué nuestro universo es el único posible, ahora nos preguntamos qué posibilita las teorías [de] la existencia de miniuniversos de nuestro tipo. Aunque esta pregunta sigue siendo muy difícil, es mucho más sencilla que la anterior. A nuestro modo de

ver, la modificación del punto de vista sobre la estructura global del universo y sobre nuestro lugar en el mundo es una de las consecuencias más importantes del desarrollo del escenario del universo inflacionario.

Según destacaba Linde, y ha quedado claro desde entonces, esta concepción también supone una nueva posibilidad para la física. Podría ocurrir fácilmente que, en la naturaleza, estuvieran presentes muchos posibles estados cuánticos de baja energía del universo, hacia los que tal vez podría decaer, a la larga, un universo en inflación. Como la configuración de los estados cuánticos de esos campos será distinta en cada una de esas regiones, el carácter de las leyes fundamentales de la física en cada región/universo puede adquirir una apariencia distinta.

Aquí emergió el primer «paisaje» en el cual podría desarrollarse el argumento antrópico, que hemos indicado antes. Si existen muchos estados distintos a los que nuestro universo podría llegar después de la inflación, quizá el estado en el que vivimos (en el que hay una energía del vacío que no es cero y es lo bastante pequeña para que las galaxias se pudieran formar) es solo uno más entre una familia potencialmente infinita y es el que se elige para la curiosidad científica porque sustenta las galaxias, las estrellas, los planetas y la vida.

El término «paisaje», sin embargo, no surgió por primera vez en este contexto. Lo favoreció una máquina de mercadotecnia mucho más eficaz, asociada con el gigante que ha estado impulsando la teoría de partículas durante gran parte del último cuarto de siglo: la teoría de cuerdas. La teoría de cuerdas postula que las partículas elementales se componen de unos elementos aún más fundamentales, que no son partículas, sino objetos que se comportan como

cuerdas vibrantes. Así como la vibración de las cuerdas de un violín puede crear notas distintas, en esta teoría las distintas clases de vibraciones también generan objetos que, en un principio, quizá podrían comportarse como las diversas partículas elementales que hallamos en la naturaleza. Ahora bien, hay un truco: la teoría carece de consistencia matemática cuando se la define meramente en cuatro dimensiones y, al parecer, para tener sentido requiere de muchas más dimensiones. Qué le ocurre a las otras dimensiones no resulta obvio a primera vista; tampoco la cuestión de qué otros objetos, aparte de las cuerdas, podrían ser importantes para definir la teoría. Son solo algunos de los muchos desafíos no resueltos que se han presentado hasta la fecha y han apagado un tanto el entusiasmo inicial que despertó la idea.

Este no es el lugar para analizar a fondo la teoría de cuerdas y, de hecho, probablemente es imposible realizar tal análisis a fondo, porque si algo ha quedado claro en los últimos veinticinco años, es que lo que en su momento se denominó «teoría de cuerdas» es algo a todas luces más complicado y complejo, y algo cuya naturaleza y constitución fundamental sigue siendo un misterio.

Aún no tenemos ni idea de si este asombroso edificio teórico tiene en verdad algo que ver con el mundo real. Sin embargo, quizá ninguna otra concepción teórica ha tenido tanto éxito a la hora de impregnar la conciencia de la comunidad de la física sin haber demostrado aún su capacidad para resolver adecuadamente ni un solo misterio experimental de la naturaleza.

Muchos lectores entenderán la última frase como una crítica contra la teoría de cuerdas; pero, aunque en el pasado me han tildado de detractor, aquí no me mueve esta

intención, ni me ha movido tal intención en las numerosas conferencias y los debates públicos que, cargado de buena intención, he sostenido sobre este tema con mi amigo Brian Greene, uno de los máximos propulsores de la teoría de cuerdas. Antes bien, yo creo que, simplemente, hace falta abrirse más paso entre la fascinación popular por la verificación en la realidad. La teoría de cuerdas implica unas matemáticas y unas ideas fascinantes que tal vez podrían arrojar luz sobre una de las inconsistencias más fundamentales de la física teórica: nuestra incapacidad de formular la relatividad general de Einstein de tal modo que se combine con las leyes de la mecánica cuántica y de ello resulten predicciones razonables sobre cómo se comporta el universo en sus escalas más diminutas.

He escrito todo un libro sobre el modo en que la teoría de cuerdas ha intentado sortear este escollo; pero, para el propósito de estas páginas, bastará con un breve resumen. La propuesta central es fácil de formular, aunque difícil de llevar a cabo. En las escalas muy pequeñas, adecuadas a la escala en la que podrían surgir por primera vez los problemas entre la gravedad y la mecánica cuántica, las cuerdas elementales pueden rizarse formando bucles cerrados. Entre el conjunto de excitaciones de tales bucles cerrados siempre existe alguna excitación que tiene las propiedades de la partícula que, en la teoría cuántica, transmite la fuerza de gravedad: el gravitón. Así pues, la teoría cuántica de tales cuerdas proporciona, en principio, el campo de juego en el cual acaso podría construirse una auténtica teoría cuántica de la gravedad.

Ciertamente, se descubrió que una teoría de esta índole podría evitar, quizá, las incómodas predicciones infinitas de la concepción cuántica típica de la gravedad. Pero había un

problema. En la versión más simple de la teoría, tales predicciones infinitas pueden obviarse solo si las cuerdas que forman las partículas elementales vibran no en las meras tres dimensiones de espacio y una de tiempo que todos conocemos, sino… ¡en veintiséis dimensiones!

Uno habría esperado quizá que tal salto de complejidad (o hasta de fe) sería suficiente para que la mayoría de los físicos dejaran de prestar atención a esta teoría; pero mediados los años ochenta, varios hermosos trabajos matemáticos de toda una serie de personas —señaladamente, de Edward Witten, en el Instituto de Estudios Avanzados, de Princeton— demostraron que esta teoría, en principio, podía aportar bastante más que una teoría cuántica de la gravedad. Al introducir nuevas simetrías matemáticas —entre las que destaca un marco matemático especialmente poderoso, denominado de «supersimetría»—, posibilitó reducir el número de dimensiones necesarias para la consistencia de la teoría de las veintiséis iniciales a tan solo diez.

Más importante aún, sin embargo, fue que no pareció imposible, en el contexto de la teoría de cuerdas, unificar la gravedad con las otras fuerzas de la naturaleza para formar una teoría única; ¡incluso pareció posible llegar a explicar la existencia de todas y cada una de las distintas partículas elementales conocidas en la naturaleza! Por último, pareció que tal vez podría haber una única teoría en diez dimensiones, que reproduciría todo lo que vemos en nuestro mundo cuatridimensional.

Así empezó a divulgarse la aspiración a una «Teoría de Todo», no solo en las publicaciones científicas, sino también en la literatura popular. Por ello, quizá hay más personas familiarizadas con las «supercuerdas» que con la

«superconductividad», como se denomina al hecho notable de que, cuando algunos materiales se enfrían hasta alcanzar temperaturas extremadamente bajas, pueden conducir la electricidad sin ninguna clase de resistencia. La superconductividad no solo es una de las propiedades de la materia más asombrosas que se hayan observado nunca, sino que ya ha transformado nuestra comprensión de la constitución cuántica de los materiales.

Por desgracia, los veinticinco años que, más o menos, han transcurrido desde entonces no han sentado demasiado bien a la teoría de cuerdas. Al tiempo que las mejores mentes teóricas del mundo empezaron a centrar su atención en ella y, en el proceso, crearon múltiples volúmenes de nuevos resultados y una gran cantidad de nueva matemática (Witten llegó a ganar el premio matemático más importante, por ejemplo), quedó claro que las «cuerdas» de la teoría de cuerdas, probablemente, distan mucho de ser los objetos fundamentales. Probablemente, el comportamiento de la teoría lo controlan otras estructuras más complejas, conocidas como «branas», con un nombre que deriva de las membranas celulares que existen en las dimensiones superiores.

Lo que es peor: empezó a desaparecer el carácter único de la teoría. A fin de cuentas, el mundo de nuestra experiencia no es decadimensional, sino cuatridimensional. Algo tiene que pasar con las otras seis dimensiones espaciales, y la explicación canónica de su invisibilidad es que, de algún modo, se han «compactado»; es decir, se han rizado en escalas tan ínfimas que no podemos resolverlas en nuestras escalas, ni siquiera en las escalas minúsculas que examinan en la actualidad nuestros aceleradores de partículas de la más alta energía.

Existe una diferencia entre esta propuesta de dominios ocultos y los dominios de la espiritualidad y la religión, pese a que, a primera vista, quizá no parezcan tan distintos. En primer lugar, serían dominios accesibles, en principio, si uno construyera un acelerador lo bastante energético (algo situado fuera de los límites del pragmatismo, quizá, pero no de la posibilidad). En segundo lugar, quizá cabría esperar que, como ocurre con las partículas virtuales, pudiéramos hallar alguna prueba indirecta de su existencia, por medio de los objetos que podemos medir en nuestro universo cuatridimensional. En suma: como estas dimensiones se propusieron como parte de una teoría desarrollada con la intención de explicar el universo, y no justificarlo, quizá al final terminarían siendo accesibles al examen empírico, aunque la probabilidad sea escasa.

Pero más allá de esto, la posible existencia de estas dimensiones adicionales significa poner en todo un compromiso la esperanza de que nuestro universo sea único. Si uno empieza con una teoría única en diez dimensiones (que, lo repito, aún no sabemos que exista), entonces toda forma de compactar las seis dimensiones invisibles puede resultar en un tipo distinto de universo cuatridimensional, con leyes de la física distintas, fuerzas distintas y partículas distintas, y gobernadas por simetrías distintas. Algunos teóricos han calculado que, de una única teoría de cuerdas decadimensional, podrían obtenerse quizá 10^{500} posibles universos cuatridimensionales consistentes. ¡La «Teoría de Todo», de golpe, se ha convertido en una «Teoría de Cualquier Cosa»!

Esta situación se pone de relieve, con sarcasmo, en una viñeta de una de mis historietas científicas favoritas, llamada *xkcd*. En esta viñeta, una persona le dice a otra: «Acabo de

tener una idea asombrosa. ¿Y si toda la materia y la energía se componen de minúsculas cuerdas vibrantes?». La segunda persona dice: «¡Muy bien! Y eso ¿qué implicaría?». A lo que la primera replica: «Ni idea».

Con un tono ligeramente menos jocoso, el físico Frank Wilczek, galardonado con el premio Nobel, ha sugerido que los teóricos de cuerdas se han inventado una nueva forma de hacer física, que recuerda a una nueva forma de jugar a los dardos. Primero, uno lanza el dardo contra una pared en blanco; y luego uno se acerca a esa pared y dibuja una diana alrededor del punto donde el dardo se ha clavado.

Aunque el comentario de Frank refleja con acierto la atención exagerada que en buena parte ha recibido el tema, debemos hacer hincapié en que, al mismo tiempo, los que trabajan en la teoría se esfuerzan sinceramente por descubrir principios que tal vez podrían gobernar el mundo en el que vivimos. Sin embargo, la plétora de posibles universos cuatridimensionales que solía incomodar a los teóricos de cuerdas se ha convertido ahora en una virtud de la teoría. Cabe imaginar que, en un «multiverso» decadimensional, se puede integrar toda una serie de universos cuatridimensionales (o pentadimensionales, o hexadimensionales, etcétera) distintos y que cada uno de ellos puede tener leyes de la física distintas; y, además, en cada uno de ellos, la energía del espacio vacío puede ser diferente.

Aunque suena a invención *ad hoc*, parece ser una consecuencia automática de la teoría y crea en efecto un auténtico «paisaje» multiversal que acaso podría representar un marco natural para el desarrollo de una comprensión antrópica de la energía del espacio vacío. En este caso, no necesitamos un número infinito de posibles universos

separados en el espacio tridimensional. Antes bien, podemos imaginar un número infinito de universos amontonados sobre un único punto de nuestro espacio, invisibles para nosotros; pero cada uno de ellos podría exhibir propiedades notablemente distintas.

Quiero hacer hincapié en que esta teoría no es tan trivial como las reflexiones teológicas de santo Tomás de Aquino al respecto de si varios ángeles podían ocupar el mismo lugar; teólogos posteriores se burlaron de esta idea, tildándola de conjetura estéril sobre cuántos ángeles podían caber en la punta de una aguja (o, con una imagen más popular, en una cabeza de alfiler). Tomás de Aquino terminó respondiendo esta pregunta por sí mismo: concluyó que más de un ángel no podía ocupar el mismo espacio. Por descontado, ¡sin ninguna clase de justificación teórica o experimental! (Y si hubieran sido ángeles bosónicos, habría errado la respuesta, en cualquier caso).

En este escenario, y con las matemáticas adecuadas, uno podría confiar, en principio, en hacer auténticas predicciones físicas. Por ejemplo, se podría derivar una distribución de probabilidades que describiera cuán plausible sería hallar distintos tipos de universos cuatridimensionales integrados en un multiverso dimensional mayor. Se podría descubrir, por ejemplo, que el grueso de tales universos cuya energía del vacío es pequeña también cuentan con tres familias de partículas elementales y cuatro fuerzas distintas. O uno podría encontrar que solo en universos con una pequeña energía del vacío puede existir una fuerza electromagnética de largo alcance. Cualquier resultado similar podría acaso proporcionar pruebas razonablemente convincentes de que una explicación antrópica probabilista de la energía del

espacio vacío —en otras palabras: hallar que un universo con la apariencia del nuestro y una energía del vacío pequeña no es improbable— tiene pleno sentido, desde el punto de vista de la física.

Sin embargo, las matemáticas aún no nos han llevado así de lejos, y quizá no lo hagan nunca. Ahora bien, a pesar de nuestra actual impotencia teórica, esto no significa que esta posibilidad no la lleve a cabo de hecho la naturaleza.

Entre tanto, no obstante, la física de partículas ha llevado el razonamiento antrópico un paso más allá.

Los físicos de partículas llevan mucha ventaja a los cosmólogos. La cosmología solo ha generado una cantidad totalmente misteriosa: la energía del espacio vacío, de la que no entendemos prácticamente nada. ¡En cambio, la física de partículas no ha comprendido muchas más cantidades durante mucho más tiempo!

Por ejemplo: ¿por qué hay tres generaciones de partículas elementales —como el electrón y sus primos más pesados, el muón y el tau; o como los tres conjuntos distintos de quarks— cuya serie energética inferior constituye el grueso de la materia que hallamos sobre la Tierra? ¿Por qué la gravedad es mucho más débil que las otras fuerzas de la naturaleza, tales como el electromagnetismo? ¿Por qué un protón pesa 2.000 veces más que un electrón?

Algunos físicos de partículas se han subido ahora al carro antrópico, de una forma extrema, quizá porque sus intentos de explicar estos misterios de acuerdo con causas físicas no han tenido éxito hasta el momento. A fin de cuentas, si una cantidad fundamental en la naturaleza es en realidad un accidente ambiental, ¿por qué no lo van a ser también la mayoría de los demás parámetros fundamentales (o incluso todos ellos)? Quizá todos los misterios de la teoría

de partículas se pueden resolver invocando este mismo mantra: si el universo fuera de cualquier otro modo, no podríamos vivir en él.

Cabe preguntarse si esta clase de solución de los misterios de la naturaleza es en realidad una solución digna de tal nombre o, más importante aún: si describe la ciencia según la entendemos. Después de todo, el objetivo de la ciencia —y en particular, de la física— a lo largo de los últimos 450 años ha sido explicar por qué el universo tiene que ser de la forma que constatamos, con nuestras mediciones, que es; y no explicar por qué, en general, las leyes de la naturaleza producirían universos muy distintos.

Por mi parte, he intentado aclarar por qué no es exactamente así, es decir, por qué muchos científicos respetables se han pasado al principio antrópico y por qué varios de ellos se han esforzado mucho en averiguar si, sobre esa base, podríamos quizá aprender algo nuevo sobre nuestro universo.

Ahora permítanme ir más allá e intentar explicar cómo la existencia de universos indetectables en todo caso —ya sea porque distancias virtualmente infinitas en el espacio los apartan de nosotros o, pese a tenerlos delante mismo de nuestras narices, porque los apartan de nosotros distancias microscópicas en posibles dimensiones adicionales— podría quedar sujeta, pese a todo, a alguna clase de prueba experimental.

Imaginemos, por ejemplo, que concebimos una teoría basada en la unificación de, por lo menos, tres de las cuatro grandes fuerzas de la naturaleza. Sería una especie de Gran Teoría Unificada, un tema que ha despertado un continuo e intenso interés en la física de partículas (entre aquellos que no han abandonado la búsqueda de teorías fundamentales

en cuatro dimensiones). Tal teoría haría predicciones sobre las fuerzas de la naturaleza que medimos y sobre el espectro de partículas elementales que investigamos en nuestros aceleradores. Si esta clase de teoría realizara toda una serie de predicciones que luego se verificarán en nuestros experimentos, tendríamos buenas razones para pensar que contiene al menos algo de verdad.

Bien, supongamos que esta teoría también predice un período de inflación en el universo inicial y, de hecho, predice que nuestra época inflacionaria es tan solo una más entre toda una serie de episodios tales, en un multiverso en eterna inflación. Incluso si no pudiéramos explorar directamente la existencia de tales regiones más allá de nuestro horizonte, entonces, como apuntaba en el capítulo 6, si algo anda como un pato y grazna como un pato… En fin, pues eso.

Hallar un posible respaldo empírico para las ideas que tienen que ver con las dimensiones adicionales es mucho más dificultoso, pero no imposible. Muchos teóricos jóvenes y brillantes están dedicando su carrera profesional a la esperanza de desarrollar la teoría hasta el punto en el que pueda haber alguna prueba, aunque sea indirecta, de que es acertada. Quizá hayan depositado la esperanza en mal lugar, pero el paso que han dado es un síntoma de su insatisfacción con la situación anterior. Quizá alguna de las pruebas del nuevo Gran Colisionador de Hadrones, en las inmediaciones de Ginebra, nos revele alguna ventana (hasta el momento oculta) abierta a esta nueva física.

Así pues, tras un siglo de avances asombrosos y verdaderamente inauditos en nuestra comprensión de la naturaleza, ahora nos hallamos en situación de examinar el universo en escalas que anteriormente eran inimaginables.

Hemos comprendido la naturaleza de la expansión del Big Bang, remontándonos hasta sus primerísimos microsegundos iniciales, y hemos descubierto la existencia de cientos de miles de millones de nuevas galaxias, con cientos de miles de millones de nuevas estrellas. Hemos averiguado que el 99% del universo, de hecho, nos resulta invisible: lo forma una materia oscura que, muy probablemente, es alguna clase nueva de partícula elemental, y una energía aún más oscura, cuyo origen sigue siendo todo un misterio, en la actualidad.

Y, después de todo esto, puede ser que la física se convierta en una de las «ciencias ambientales». Las constantes fundamentales de la naturaleza, que durante tanto tiempo se ha supuesto que poseían una importancia especial, quizá no sean más que accidentes ambientales. Dado que los científicos tendemos a tomarnos demasiado en serio, a nosotros mismos y nuestra ciencia, quizá también nos hayamos tomado nuestro universo demasiado en serio. De una forma literal, y no solo metafórica, tal vez estamos haciendo «mucho ruido por nada». Por lo menos, ¡quizá estaremos dando demasiada importancia a la nada que domina nuestro universo! Tal vez nuestro universo se parece más a una lágrima perdida en un inmenso océano multiversal de posibilidades. Tal vez nunca hallaremos una teoría que describa por qué el universo tiene que ser como es.

O tal vez sí la hallaremos.

Este ha sido, hasta este punto, el panorama más preciso que sé pintar de la realidad según la entendemos ahora. Se basa en la obra de decenas de miles de mentes entregadas a su trabajo a lo largo del siglo pasado, que han construido algunas de las máquinas más complejas jamás concebidas y

desarrollado algunas de las ideas más hermosas —y también más complejas— con las que la humanidad ha tenido que lidiar nunca. Es un panorama cuya creación pone de manifiesto lo mejor del hecho de ser humanos: nuestra capacidad de imaginar las vastas posibilidades de la existencia y la audacia de explorarlas con valentía; y ello, sin «pasar la pelota» a una fuerza creativa inconcreta o a un creador que, por definición, resulta siempre incomprensible. Transformar esta experiencia en sabiduría es algo que nos debemos a nosotros mismos. Si actuáramos de otro modo, seríamos injustos con todos los brillantes y valerosos individuos que nos han ayudado a alcanzar el estado de conocimientos actual.

Si deseamos extraer conclusiones filosóficas sobre nuestra propia existencia, nuestra significación y la del propio universo, nuestras conclusiones tienen que basarse en conocimiento empírico. Una mente verdaderamente abierta supone obligar a nuestra imaginación a que se adecúe a la realidad demostrada, y no viceversa, tanto si nos gusta lo que ello implica como si no.

NADA ES ALGO

No me importa no saber. No me da miedo.

RICHARD FEYNMAN

Isaac Newton, que fue quizá el mejor de los físicos de todos los tiempos, transformó profundamente nuestra forma de pensar sobre el universo, en muchos aspectos. Pero quizá su contribución más importante fue demostrar la posibilidad de que todo el universo es explicable. Con su ley de la gravitación universal, demostró por primera vez que incluso los cielos podían someterse al poder de las leyes naturales. Un universo extraño, hostil, amenazador y en apariencia caprichoso quizá no sea para nada así.

Si el universo estuviera gobernado por leyes inmutables, los dioses míticos de las antiguas Grecia y Roma habrían sido impotentes. No habría habido ninguna libertad para modificar el mundo arbitrariamente con el fin de crear problemas espinosos a la humanidad. Lo que valía para Zeus, se aplicaría igualmente al Dios de Israel. ¿Cómo podía el Sol quedarse quieto a mediodía, si el Sol no orbitaba en torno de la Tierra, sino que su movimiento en el cielo lo causaba en realidad la revolución de la Tierra que, si se detenía de pronto, produciría fuerzas en su superficie que destruirían todas las estructuras humanas y, junto con ellas, a los propios humanos?

Por descontado, la razón de ser de los milagros son los actos sobrenaturales. A fin de cuentas, son precisamente lo que se salta las leyes de la naturaleza. Es de suponer que un dios capaz de crear las leyes de la naturaleza también se las puede saltar a voluntad. Aunque ¿por qué se las saltaban tan a menudo hace miles de años, antes de que se inventaran los modernos instrumentos de comunicación, que podrían

haber dejado constancia del hecho, y sin embargo en la actualidad ya no ocurre así? Aún vale la pena seguir considerando esta cuestión.

Sea como fuere, incluso en un universo sin milagros, cuando uno se enfrenta con un orden subyacente de extrema simplicidad puede extraer dos conclusiones distintas. La primera —a la que llegó el propio Newton, y había llegado antes Galileo, y una auténtica multitud de científicos a lo largo de los años— era que tal orden había sido creado por una inteligencia divina, responsable no solo del universo, sino también de nuestra propia existencia; y que nosotros, los seres humanos, fuimos creados a su imagen (¡y al parecer, otros seres hermosos y complejos, no!). La segunda conclusión es que no existe nada más que las propias leyes. Las leyes en sí requieren que nuestro universo llegue a existir, se desarrolle y evolucione; y nosotros somos una consecuencia irrevocable de esas leyes. Tales leyes pueden ser eternas o haber llegado a existir, también ellas, de nuevo por efecto de algún proceso aún desconocido pero, posiblemente, puramente físico.

Los filósofos, teólogos y, en ocasiones, científicos siguen debatiendo sobre estas posibilidades. No tenemos la certeza de cuál de ellas describe en realidad nuestro universo y tal vez no lleguemos a averiguarlo nunca. Pero lo que importa —según ya he recalcado en el principio mismo de este libro — es que la decisión última sobre esta cuestión no procederá de la esperanza, el deseo, la revelación o el pensamiento puro. Vendrá —si es que llega alguna vez— de la exploración de la naturaleza. Ya sea sueño o pesadilla, como decía Jacob Bronowski en la cita inicial de este libro —y en este caso, es fácil que el sueño de una persona sea la pesadilla de otra—, es preciso que vivamos nuestra

experiencia tal y como es, con los ojos abiertos. El universo es como es, nos guste o no.

Y a este respecto, me parece *extraordinariamente significativo* el hecho de que un universo de la nada —en un sentido que me esforzaré por precisar—, que surge de forma natural e incluso inevitable, es cada vez más coherente con todo lo que hemos llegado a saber sobre el mundo. Este saber *no* se ha debido a reflexiones filosóficas o teológicas sobre la moralidad, ni a otras conjeturas sobre la condición humana. Se basa, por el contrario, en los asombrosos y emocionantes avances de la física de partículas y la cosmología empírica, que he descrito anteriormente.

Con esto quiero volver a la pregunta que formulé al comenzar este libro: ¿por qué hay algo en vez de nada? Supongo que ahora estamos más capacitados para ocuparnos de ello, tras haber repasado la moderna concepción científica del universo, su historia y su posible futuro, así como descripciones operativas de qué podría comprender de hecho la «nada». Según indiqué también al principio de este libro, es una pregunta a la que también la ciencia ha dado forma (como, en lo esencial, a toda esta clase de preguntas filosóficas). Lejos de proporcionar un marco que nos imponga el requisito de un creador, el simple significado de las palabras implicadas ha cambiado tanto que la frase ha perdido buena parte de su sentido original; y esto es algo que, de nuevo, no es poco común, puesto que el conocimiento empírico arroja una luz nueva sobre rincones de nuestra imaginación que, de otro modo, quedan en la oscuridad.

Al mismo tiempo, en ciencia tenemos que ser especialmente cautos con las preguntas del tipo *¿por qué?* Cuando preguntamos *por qué*, lo que por lo general nos

interesa es el *cómo*. Responder a esta última pregunta suele ser suficiente para nuestro propósito. Por ejemplo, podríamos preguntar: «¿Por qué la Tierra dista 150 millones de kilómetros del Sol?», pero lo que probablemente queremos saber es *cómo* ha ocurrido. Es decir, nos interesa saber qué procesos físicos hicieron que la Tierra acabara en su posición actual. Implícitamente, un *por qué* hace pensar en un propósito, pero cuando intentamos comprender el sistema solar desde el punto de vista científico, por lo común no le atribuimos ningún propósito.

Así, daré por sentado que lo que realmente se quiere averiguar con esta pregunta es: «¿Cómo ha ocurrido que hay algo en vez de nada?». De hecho, estas preguntas por el *cómo* son las únicas a las que podemos dar respuestas definitivas mediante el estudio de la naturaleza; pero como la frase así expresada suena muy extraña a nuestros oídos, confío en que el lector me perdonará si, en ocasiones, caigo en la trampa de atender a la formulación más típica, en apariencia, cuando en realidad me interesa responder a la pregunta más específica, sobre el *cómo*.

Incluso aquí, desde la perspectiva de la comprensión actual, esta pregunta en concreto ha sido suplantada por una serie de preguntas que, operativamente, dan más fruto, como por ejemplo: «¿Qué podría haber producido las propiedades del universo que lo caracterizan de un modo más llamativo en la actualidad?», o, lo que quizá es más importante: «¿Cómo lo podríamos averiguar?».

En este punto quisiera, una vez más, hacer leña de lo que ojalá fuera un árbol caído. Formular preguntas de esta manera permite generar nuevo conocimiento y nuevas formas de comprensión. Esto es lo que las diferencia de las preguntas puramente teológicas, que, por lo general, ya dan

por sentadas las respuestas. De hecho, he desafiado a varios teólogos a proporcionar pruebas que nieguen la idea de que la teología no ha aportado nada al conocimiento en los últimos quinientos años, como mínimo, desde el despertar de la ciencia. Hasta ahora, nadie ha presentado un contraejemplo. Lo máximo que he conseguido ha sido que me pregunten qué quiero decir cuando hablo de «conocimiento». Bien, desde una perspectiva epistemológica, esta quizá sea una cuestión espinosa; pero sostengo que, si hubiera una alternativa mejor, alguien la habría presentado. Si hubiera desafiado del mismo modo a biólogos, o psicólogos, o historiadores, o astrónomos, ninguno de ellos se habría quedado tan cortado.

Las respuestas a esta clase de preguntas fructíferas incluyen predicciones teóricas que se pueden poner a prueba mediante experimentos, para lograr que nuestro conocimiento operativo del universo avance más directamente. En parte por esta razón, hasta estas páginas del libro me he centrado en este tipo de preguntas fructíferas. No obstante, la cuestión del «algo desde la nada» sigue teniendo gran vigencia y, por lo tanto, probablemente es preciso plantearla.

La obra de Newton redujo radicalmente el dominio posible de las acciones de Dios, independientemente de si uno atribuye o no alguna racionalidad inherente al universo. Y las leyes de Newton no solo limitaron claramente la libertad de acción de una divinidad, sino que prescindieron de varios requisitos que suponían la intervención sobrenatural. Así, Newton descubrió que el movimiento de los planetas en torno del Sol no requiere que se los empuje continuamente en su órbita, sino más bien —de un modo apenas intuitivo— que tire de ellos una fuerza que los atrae

hacia el Sol. Esto supone prescindir de la necesidad de aquellos ángeles que, a menudo, se invocaba antaño como guías de los trayectos planetarios. Aunque haber terminado con esta función particular de los ángeles tuvo poco impacto en la disposición de la gente a creer en ellos (según las encuestas, en Estados Unidos son muchas más las personas que creen en los ángeles que en la evolución), es justo decir que el avance de la ciencia, desde Newton, ha limitado aún más seriamente las oportunidades disponibles para que la mano de Dios se manifieste en la que se dice es su obra.

Podemos describir la evolución del universo hasta los primeros momentos del Big Bang sin necesitar de una manera específica nada que vaya más allá de las leyes físicas conocidas; y también hemos descrito la probable historia futura del universo. Desde luego, aún hay enigmas sobre el universo que todavía no entendemos; pero voy a suponer que los lectores de este libro no suscriben la idea de un «Dios de los huecos», por la que se invoca a Dios siempre que en nuestras observaciones hay algo concreto que o parece desconcertar o no se comprende del todo. Incluso los teólogos reconocen que este recurso no solo disminuye la grandeza de su ser supremo, sino que también abre la puerta a que se lo elimine, o al menos se lo margine aún más, cada vez que un nuevo trabajo explica o elimina el rompecabezas.

En este sentido, el argumento del «algo surgido de la nada», en realidad, intenta centrarse en el acto original de creación y pregunta si una explicación científica puede llegar a resolver esta cuestión de una manera plenamente satisfactoria y sin deficiencias lógicas.

Resulta que, dada nuestra comprensión actual de la naturaleza, la cuestión del «algo de la nada» adquiere tres

significados distintos entre sí. La respuesta más corta, en los tres casos, es siempre: «es muy plausible que sí». Las analizaré por orden, en el resto de este libro, al tiempo que intento explicar por qué es así (o mejor aún, según acabo de comentar: *cómo* es así).

La navaja de Ockham sugiere que, si algún acontecimiento es plausible, desde el punto de vista de la física, para que se produzca no es preciso recurrir a requisitos más extraordinarios. Sin duda, entre ellos está el requisito de una divinidad omnipotente que, de algún modo, existe fuera de nuestro universo (o multiverso) al mismo tiempo que gobierna lo que sucede en su interior. En consecuencia, esta idea debería ser tan solo nuestro último recurso, no el primero.

En el prefacio de este libro ya he razonado que definir «la nada» meramente como una «inexistencia» no es suficiente para sugerir que la física y, más en general, la ciencia no son adecuadas para resolver esta cuestión. Déjenme aportar aquí un argumento adicional, más específico. Imaginemos una pareja electrón-positrón que, de forma espontánea, emerge del espacio vacío cerca del núcleo de un átomo y afecta la propiedad de ese átomo durante el breve tiempo de existencia de la pareja. ¿En qué sentido existían antes el electrón o el positrón? Sin lugar a dudas, según todas las definiciones razonables, no existían. Su existencia era potencial, desde luego, pero esto no define el ser, igual que un ser humano potencial no existe por el mero hecho de que yo tenga semen en mis testículos cerca de una mujer que esté ovulando y ella y yo podamos irnos a la cama. De hecho, la mejor respuesta que he oído nunca a la pregunta de a qué se parecería estar muerto (es decir, ser inexistente) es imaginar cómo era ser antes de ser

concebido. En cualquier caso, si el potencial de existir fuera lo mismo que la existencia, no me cabe duda de que, en este momento, la masturbación sería un asunto legal tan candente como el aborto.

El Proyecto Orígenes, que dirijo en la Universidad Estatal de Arizona, desarrolló hace poco un taller sobre el «Origen de la vida», y me resulta imposible no situar en este contexto el presente debate cosmológico. Aún no comprendemos del todo cómo se originó la vida en la Tierra. Sin embargo, no solo sabemos de mecanismos químicos plausibles que lo podrían explicar, sino que cada día estamos más cerca de conocer con detalle caminos específicos que podrían haber permitido que surgieran de forma natural biomoléculas, incluido el ARN. Además, la evolución darwiniana, basada en la selección natural, describe de forma convincente y precisa cómo la vida compleja emergió en este planeta, a partir de los mecanismos químicos específicos que fuera que produjeron las primeras células capaces de replicarse fielmente con un metabolismo que captara energía de su entorno. (Esta es la mejor definición de *vida* que soy capaz de ofrecer por el momento).

Así como Darwin, aunque fuera a su pesar, eliminó la necesidad de intervención divina en la evolución del mundo moderno al examinar la diversidad de la vida por todo el planeta (pese a que dejó la puerta abierta a la posibilidad de que Dios ayudara a insuflar vida en las primeras formas), nuestra comprensión actual del universo, su pasado y su futuro hacen más plausible que «algo» pueda emerger de la nada sin la necesidad de ninguna guía divina. Dadas las dificultades que supone la observación y la reflexión teórica derivada, a la hora de elaborar los detalles, supongo que, a

este respecto, quizá no podremos ir nunca más allá de lo plausible. Pero esta simple plausibilidad, a mi modo de ver, es un enorme paso adelante en el camino de reunir el coraje para vivir vidas cargadas de sentido en un universo que probablemente llegó a existir (y quizá deje de existir) sin un propósito; y, ciertamente, sin tenernos a nosotros en su centro.

Volvamos ahora a una de las características más sorprendentes de nuestro universo: está tan cerca de ser plano como alcanzamos a medir. Recordemos el rasgo único de un universo plano, al menos en escalas donde está dominado por materia en forma de galaxias y donde el enfoque newtoniano sigue siendo válido: en un universo plano —y solo en un universo plano— el promedio de energía gravitacional newtoniana de todos los objetos que participan en la expansión es precisamente cero.

Quiero hacer hincapié en que este era un postulado falsable. No tenía que ser así necesariamente. Nada lo exigía, salvo conjeturas teóricas basadas en reflexiones sobre un universo que podría haber surgido naturalmente de la nada (o, como mínimo, casi de la nada).

Quiero destacar asimismo la importancia del hecho de que, desde el momento en que incluimos la gravedad en nuestra consideración de la naturaleza, ya no somos libres para definir arbitrariamente la energía total de un sistema; y del hecho de que esa energía recibe contribuciones tanto positivas como negativas. Determinar la energía gravitatoria total de objetos arrastrados por la expansión del universo no depende de una definición arbitraria, igual que no lo es la curvatura geométrica del universo. Es una propiedad del espacio en sí, según la relatividad general; y esta propiedad del espacio la determina la energía que contiene en su

interior.

Digo esto porque se ha defendido que es arbitrario afirmar que el total de la energía gravitacional newtoniana de toda galaxia sita en un universo plano en expansión es cero y que cualquier otro valor sería igual de válido, pero que los científicos «definen» el punto cero como argumento contra Dios. Así lo defendió, en cualquier caso, Dinesh D'Souza en el marco de sus debates con Christopher Hitchens sobre la existencia de Dios.

Nada podría estar más lejos de la verdad. El empeño de determinar la curvatura del universo lo llevaron a cabo, durante más de medio siglo, científicos que dedicaron su vida a determinar la naturaleza real del universo, no a imponer sobre este sus propios deseos. Incluso mucho después de que se propusieran los primeros argumentos teóricos al respecto de por qué el universo debía ser plano, mis colegas de observación, durante los años ochenta y hasta los primeros años noventa, siguieron decididos a demostrar lo contrario. A fin de cuentas, en ciencia, no se logra el impacto mayor (y a menudo, los titulares más llamativos) cuando se acompaña al rebaño, sino cuando se va en contra.

Ahora bien, la última palabra la tienen los datos, y la última palabra ya la sabemos: nuestro universo observable está tan cerca de ser plano como alcanzamos a medir. La energía gravitacional newtoniana de las galaxias que se desplazan con la expansión de Hubble es cero, nos guste o no.

Ahora quisiera describir cómo, si nuestro universo surgió de la nada, lo que deberíamos esperar es precisamente un universo plano, con una energía gravitatoria newtoniana total de cada objeto igual a cero. El

argumento es un poco sutil —más de lo que he sido capaz de describir en mis conferencias populares sobre la cuestión —, por lo que me alegra tener aquí espacio para intentar exponerlo detenidamente.

Primero, quiero dejar claro a qué clase de «nada» aludo en este punto. Se trata de la versión más sencilla de la nada: el espacio vacío. Por el momento, supondré que existe el espacio, con absolutamente nada en su interior, y que existen también las leyes de la física. Una vez más, me doy cuenta de que, entre las versiones de la nada revisadas por quienes ansían redefinir continuamente la palabra para que no contemos con ninguna definición científica práctica, la versión antes citada no está a la altura de las circunstancias. Pero sospecho que, en los tiempos de Platón y Tomás de Aquino, cuando reflexionaban sobre por qué había algo en vez de nada, el espacio vacío con nada en su interior era, probablemente, una buena aproximación a aquello en lo que estaban pensando.

Como vimos en el capítulo 6, Alan Guth ha explicado precisamente cómo podemos obtener algo de esta clase de nada: la versión definitiva de la «comida gratis». El espacio vacío puede tener asociada una energía no cero, incluso en ausencia de cualquier materia o radiación. La relatividad general nos dice que el espacio se expandirá exponencialmente, de modo que incluso la más diminuta de las regiones de los primeros tiempos podría pasar a abarcar, rápidamente, una dimensión lo bastante grande para contener todo nuestro actual universo visible.

Como también describí en ese capítulo, durante esta expansión tan rápida, la región que a la postre abarcará nuestro universo se tornará cada vez más plana al tiempo que la energía contenida en el espacio vacío crece, según

crece el universo. Este fenómeno ocurre sin necesidad de ningún «hocus pocus» ni intervención milagrosa. Es posible porque la «presión» gravitatoria asociada con esta energía del espacio vacío es de hecho negativa. Esta «presión negativa» supone que, según se expande el universo, la expansión vierte energía *al* espacio, antes que viceversa.

Según esta concepción, cuando la inflación termina, la energía almacenada en el espacio vacío se ve convertida en una energía de radiación y partículas reales, lo que crea, de hecho, el inicio trazable de nuestra actual expansión de Big Bang. Me refiero a la trazabilidad de ese inicio porque la inflación, de hecho, borra todo recuerdo del estado del universo antes de que empezara. Todas las complejidades e irregularidades en escalas inicialmente grandes (si el universo o multiverso preexistente inicial fuera grande, incluso infinitamente grande) se igualan y/o se ven conducidas tan lejos de nuestro horizonte actual que, después de que se haya producido la suficiente expansión inflacionaria, siempre observaremos un universo casi uniforme.

Digo «casi uniforme» porque, según describí también en el capítulo 6, la mecánica cuántica siempre dejará algunas fluctuaciones residuales, de baja densidad, que quedan congeladas durante la inflación. Esto nos lleva a la segunda consecuencia asombrosa de la inflación: que las fluctuaciones de baja densidad en el espacio vacío, debidas a las reglas de la mecánica cuántica, más adelante serán responsables de todas las estructuras que observamos en el universo en la actualidad. Por eso nosotros, y todo cuanto vemos, somos resultado de fluctuaciones cuánticas en lo que es esencialmente nada cerca del principio del tiempo: durante la expansión inflacionaria.

Cuando todo el polvo se asienta, la configuración genérica de la materia y la radiación será la de un universo esencialmente plano, uno en el que el promedio de la energía gravitacional newtoniana parecerá ser cero. Y será casi siempre así, salvo que uno pudiera ajustar minuciosamente la cantidad de inflación.

En consecuencia, nuestro universo observable puede empezar siendo una región del espacio de tamaño microscópico, que puede estar esencialmente vacía, y aun así crecer hasta escalas enormes, hasta contener con el tiempo grandes cantidades de materia y radiación; y todo ello, ¡sin que le cueste ni una gota de energía y con materia y radiación bastante para explicar todo lo que vemos hoy!

La idea sobre la que vale la pena hacer hincapié en este breve resumen de la dinámica inflacionaria analizada en el capítulo 6 es que algo puede surgir del espacio vacío *precisamente* porque la energética del espacio vacío, en la presencia de gravedad, *no es* lo que el sentido común nos habría hecho suponer antes de descubrir las leyes subyacentes de la naturaleza.

Pero nadie ha dicho nunca que el universo se guía por lo que nosotros, en nuestro rincón del espacio y tiempo, nimios y miopes, pudiéramos haber creído razonable en un principio. Sin duda, parece razonable imaginar que, *a priori*, la materia no puede surgir espontáneamente del espacio vacío, de forma que *algo*, en este sentido, no puede surgir de *nada*. Pero cuando tenemos en cuenta la dinámica de la gravedad y la mecánica cuántica, hallamos que esta concepción de sentido común deja de ser verdadera. En esto radica la belleza de la ciencia, y no debemos entenderlo como una amenaza. La ciencia, simplemente, nos obliga a revisar qué es lo razonable para así acomodarnos al

universo, y no al revés.

Por resumir, entonces: haber observado que el universo es plano y que la energía gravitatoria newtoniana local es hoy, esencialmente, cero, sugiere con fuerza que nuestro universo surgió mediante un proceso similar al de la inflación; un proceso por el que la energía del espacio vacío (nada) se ve convertida en la energía de algo, durante un tiempo en el que el universo se aproxima cada vez más a ser, en lo esencial, exactamente plano en todas las escalas observables.

Mientras que la inflación demuestra cómo un espacio vacío dotado de energía puede, de hecho, crear todo lo que vemos, además de un universo increíblemente grande y plano, sería insincero sugerir que el espacio vacío provisto de energía, que impulsa la inflación, es realmente *nada*. En esta concepción, uno debe reconocer que el espacio existe y puede almacenar energía, y calcula las consecuencias utilizando para ello las leyes de la física, como la relatividad general. Por lo tanto, si nos detuviéramos aquí, sería justificado afirmar que la ciencia moderna dista mucho de haber resuelto en verdad la cuestión de cómo se obtiene algo de nada. Ahora bien, este es el primer paso. Expandiremos nuestra comprensión y veremos, acto seguido, que la inflación puede representar ni más ni menos que la punta de un cósmico iceberg de nada.

LA NADA ES INESTABLE

Fiat justitia, ruat caelum.

(Hágase justicia aunque se caiga el cielo).

Antiguo proverbio romano

La existencia de energía en el espacio vacío —el descubrimiento que sacudió nuestro universo cosmológico y la idea que forma los cimientos de la inflación— solo refuerza un aspecto del mundo cuántico que, en el contexto de la clase de experimentos de laboratorio que ya he descrito, ya se conocía bien. El espacio vacío es complicado. Es un caldo hirviente de partículas virtuales que existen y dejan de existir en un lapso de tiempo tan breve que no las podemos ver directamente.

Las partículas virtuales ponen de manifiesto una propiedad básica de los sistemas cuánticos. En el núcleo de la mecánica cuántica funciona una norma que en ocasiones rige a los políticos o a los presidentes de corporaciones: en tanto nadie mire, todo vale. Los sistemas continúan moviéndose, aunque sea solo momentáneamente, entre todos los estados posibles, incluidos estados que no se permitirían si el sistema estuviera siendo objeto de mediciones en ese momento. Estas «fluctuaciones cuánticas» implican algo esencial sobre el mundo cuántico: nada siempre produce algo, aunque solo sea por un instante. Como un corredor de bolsa que quiera robar, si el estado al que fluctúa un sistema requiere escamotear cierta energía del espacio vacío, entonces el sistema tiene que devolver esa energía en un tiempo lo bastante breve como para que nadie que esté midiendo ese sistema pueda detectarlo.

En consecuencia, cabría suponer que es seguro afirmar que este «algo» que engendran las fluctuaciones cuánticas es

efímero; no es mensurable, a diferencia de usted, de mí, o de la Tierra en la que vivimos. Pero también esta creación efímera está sujeta a las circunstancias asociadas con nuestras mediciones. Por ejemplo, pensemos en el campo eléctrico que emana de un objeto cargado. Es, sin lugar a dudas, real. La fuerza de la electricidad estática se puede notar en el pelo o en un globo que se queda pegado a una pared. Sin embargo, la teoría cuántica del electromagnetismo sugiere que el campo estático se debe al hecho de que las partículas cargadas que intervienen en la producción del campo emiten fotones virtuales que, en lo esencial, tienen una energía total de cero. Estas partículas virtuales, como tienen energía cero, pueden propagarse por todo el universo sin desaparecer, y el campo que se debe a la superposición de muchas de ellas es tan real que lo podemos sentir.

A veces, las condiciones son tales que en efecto pueden surgir del espacio vacío, con impunidad, partículas masivas reales. En un ejemplo, situamos muy cerca dos placas cargadas y, cuando el campo eléctrico entre ellas adquiere la fuerza suficiente, se torna energéticamente favorable a que una pareja real de partícula-antipartícula puede «surgir» del vacío, con la carga negativa orientada hacia la placa positiva y la carga positiva orientada a la negativa. Al hacerlo así, cabe la posibilidad de que la reducción de energía derivada de reducir la carga neta sobre cada una de las placas (y en consecuencia, el campo eléctrico intermedio) sea mayor que la energía asociada con la energía de la masa en reposo requerida para producir dos partículas reales. Por descontado, para que estas condiciones sean posibles, la fuerza del campo tiene que ser descomunal.

Existe de hecho un lugar en el que campos fuertes de

otra clase podrían permitir que ocurriera un fenómeno similar al descrito arriba; pero, en este caso, debido a la gravedad. Este descubrimiento es el que valió a Stephen Hawking la fama entre los físicos, en 1974, cuando mostró que podría ser que los agujeros negros —de los cuales, al menos en ausencia de los supuestos de la mecánica cuántica, no puede escapar nada en ningún momento— irradiaran partículas físicas.

Hay muchas formas diversas de intentar comprender este fenómeno, pero una de ellas es asombrosamente parecida a la situación que he descrito arriba para los campos eléctricos. Fuera del núcleo de los agujeros negros hay un radio denominado «horizonte de sucesos». Dentro de un horizonte de sucesos, en la concepción clásica, ningún objeto puede escapar porque la velocidad de escape supera la de la luz. Así pues, ni siquiera la luz emitida dentro de esta región podrá salir fuera del horizonte de sucesos.

Ahora imaginemos que una pareja partícula-antipartícula forma un núcleo fuera del espacio vacío, en el límite exterior mismo del horizonte de sucesos, debido a las fluctuaciones cuánticas en esa región. Es posible que, si una de las partículas llega a caer dentro del horizonte de sucesos, pierda tanta energía gravitacional al caer dentro del agujero negro que esta energía duplique la masa en reposo de cualquiera de las dos partículas. Esto significa que la partícula asociada puede salir despedida al infinito y ser observable sin ninguna violación de la conservación de la energía. La energía positiva total relativa a la partícula irradiada la compensa de sobras la pérdida de energía experimentada por la partícula asociada al caer en el agujero negro. Por lo tanto, el agujero negro puede irradiar partículas.

Esta situación es aún más interesante, sin embargo, precisamente porque la energía perdida por la partícula que cae al interior es mayor que la energía positiva relacionada con su masa en reposo. De resultas, cuando cae al agujero negro, el sistema neto del agujero negro más la partícula, de hecho, ¡suma menos energía de la que sumaba antes de que la partícula cayera al interior! El agujero negro, en consecuencia, se vuelve *más ligero* después de la caída de la partícula, por una cantidad equivalente a la energía transportada por la partícula irradiada que escapa. A la postre, el agujero negro puede irradiarse por completo al exterior. En este punto, no sabemos más, porque en los estadios finales de la evaporación de un agujero negro interviene la física en escalas de tan pequeña distancia que la relatividad general, por sí sola, no puede darnos la respuesta última. En estas escalas, la gravedad debe tratarse como una teoría de plena mecánica cuántica, y nuestra comprensión actual de la relatividad general aún no nos permite determinar con precisión qué pasará.

No obstante, todos estos fenómenos comportan que, en las circunstancias adecuadas, no solo nada puede convertirse en algo, sino que es preciso que ocurra.

En cosmología, uno de los primeros ejemplos del hecho de que la «nada» pueda ser inestable y formar algo procede de los intentos de comprender por qué vivimos en un universo de materia.

El lector, probablemente, no se despertará cada mañana preguntándose por esto, pero el hecho de que nuestro universo contenga materia es excepcional. El rasgo particularmente excepcional al respecto es que, hasta donde podemos saber, nuestro universo no contiene grandes cantidades de antimateria que, como se recordará, existe

por requisito de la relatividad y la mecánica cuántica, de modo que, para toda partícula de la que tengamos constancia en la naturaleza, puede existir una antipartícula equivalente con la carga contraria y la misma masa. Cabría pensar que, en su inicio, todo universo razonable contendrá cantidades iguales de ambas. A fin de cuentas, las antipartículas de las partículas normales tienen la misma masa y otras propiedades similares, por lo que si las partículas se crearon en los primeros tiempos, habría sido igual de fácil crear antipartículas.

Alternativamente, podríamos imaginar asimismo un universo de antimateria en el que todas las partículas que conforman las estrellas y galaxias hubieran sido sustituidas por sus antipartículas. Tal universo parecería ser casi idéntico al universo en el que vivimos. Los observadores de tal universo (compuestos ellos mismos de antimateria) no dudarían en llamar «materia» lo que nosotros llamamos «antimateria». El nombre es arbitrario.

Ahora bien, si nuestro universo hubiera empezado siendo así de razonable, con cantidades iguales de materia y antimateria, y hubiera continuado así, nosotros no estaríamos aquí para preguntar *por qué* ni *cómo*. Esto se debe a que todas las partículas de materia se habrían aniquilado con todas las partículas de antimateria, en el universo inicial, y no habrían dejado tras de sí más que pura radiación. No habría quedado materia ni antimateria que formara estrellas, o galaxias, o amantes o antiamantes que, de otro modo, el uno en brazos del otro, pudieran echar la vista arriba y sentirse emocionados por el espectáculo del cielo nocturno. Sin dramas. La historia consistiría en un vacío, un baño de radiación que se iría enfriando lentamente hasta generar, a la postre, un universo frío,

oscuro e inhóspito. La nada sería la reina suprema.

Sin embargo, en la década de 1970 los científicos empezaron a comprender que se puede empezar con cantidades iguales de materia y antimateria en un Big Bang inicial denso y caliente y, mediante procesos cuánticos plausibles, «crear algo de nada» al establecer una pequeña asimetría, con un ligero excedente de materia, frente a la antimateria, en el universo temprano. En este caso, en lugar de una aniquilación completa de materia y antimateria, que habría dado en la actualidad nada más que una pura radiación, toda la antimateria disponible en el universo temprano se habría aniquilado con la materia, pero el pequeño excedente de materia habría carecido de una cantidad similar de antimateria con la que aniquilarse y, por lo tanto, habría pervivido. Esto habría generado toda la materia que integra las estrellas y galaxias que vemos en el universo actual.

Como resultado, lo que de otro modo parecería un logro pequeño (establecer una pequeña asimetría en los primeros tiempos) quizá debería considerarse en su lugar casi como el momento de la creación. Porque desde el momento en que se crea una asimetría entre materia y antimateria, ya nada podrá quebrantarla nunca. En este punto, ya se había escrito la historia futura de un universo repleto de estrellas y galaxias. Las partículas de antimateria se aniquilarían con las de materia en el universo temprano y el resto de las partículas de materia sobreviviría hasta nuestros días, lo que determinó el carácter del universo que conocemos, amamos y habitamos.

Incluso si la asimetría fuera de una parte por un millar de millones, habría quedado materia bastante para dar cuenta de todo lo que vemos en el universo actual. De

hecho, se habría necesitado precisamente una asimetría similar, de cerca de una parte por millar de millones, porque en el fondo cósmico de microondas hay hoy, aproximadamente, 1.000 millones de fotones por cada protón del universo. Los fotones de la radiación del FCM son los restos, en este escenario, de la temprana aniquilación de materia y antimateria, cerca del principio del tiempo.

Aún no tenemos una descripción definitiva de cómo podría haber ocurrido este proceso en el universo temprano, porque aún no hemos establecido, de forma completa y empírica, la naturaleza detallada del mundo microfísico en las escalas en las que es probable que esta asimetría se hubiera generado. No obstante, se ha explorado toda una serie de diversos escenarios plausibles, a partir de las mejores ideas actuales sobre la física a esas escalas. Aunque difieren en los detalles, todos poseen las mismas características generales. Los procesos cuánticos asociados con las partículas elementales en el baño de calor primordial pueden ir transformando un universo vacío (o, de forma equivalente, a un universo inicialmente simétrico en su relación de materia y antimateria), inexorable y casi imperceptiblemente, en un universo que estará dominado por la materia o la antimateria.

Si pudiera haber ocurrido por igual de uno y otro modo, ¿fue acaso un simple accidente circunstancial que nuestro universo acabara dominado por la materia? Imaginemos que estamos en lo alto de una montaña elevada y tropezamos. La dirección en la que caemos no estaba ordenada de antemano, sino que es más bien accidental, según la dirección a la que estuviéramos mirando o el punto del paso en el que tropezáramos. Quizá el caso de nuestro universo sea similar y, aunque las leyes de la física son fijas,

la dirección última de la asimetría entre materia y antimateria se eligió según alguna condición inicial azarosa (igual que, en el caso del tropezón que nos envía montaña abajo, la ley de la gravedad es fija y determina que caeremos, pero en qué dirección ocurra puede ser accidental). Una vez más, nuestra propia existencia, en este caso, habría sido un accidente ambiental.

Ahora bien, independientemente de esta incertidumbre está el hecho llamativo de que un rasgo de las leyes físicas subyacentes puede permitir que los procesos cuánticos alejen al universo de un estado indiferenciado. El físico Frank Wilczek, que fue uno de los primeros teóricos en explorar estas posibilidades, me ha recordado que utilizó precisamente el mismo lenguaje que yo he usado previamente en este capítulo en un artículo que publicó en 1980 en *Scientific American* sobre la asimetría de materia y antimateria del universo. Tras describir cómo sería plausible que se generase una asimetría de materia y antimateria en el universo temprano, a partir de nuestra nueva comprensión de la física de partículas, comentó que esto apuntaba a una forma de responder a la pregunta de por qué hay algo, en vez de nada: la *nada* es inestable.

Frank hacía hincapié en que el excedente de materia frente a antimateria medido en el universo parecería, a primera vista, suponer un obstáculo a la hora de imaginar un universo que pudiera surgir de una inestabilidad en el espacio vacío, con un Big Bang engendrado de la nada. Pero si esta asimetría pudiera surgir de forma dinámica después del Big Bang, el obstáculo queda superado. En sus palabras:

> Cabe conjeturar que el universo comenzó en el estado más simétrico posible y que, en ese estado, no existía ninguna materia: el universo era un vacío.

> Existió un segundo estado y, en él, existió la materia. Este segundo estado era ligeramente menos simétrico, pero también poseía una energía menor. Con el tiempo, apareció una zona de fase menos simétrica, que creció con rapidez. La energía liberada por la transición halló forma en la creación de partículas. Este suceso quizá podría identificarse con el Big Bang… La respuesta a la antigua pregunta: «¿Por qué hay algo en vez de nada?», sería, pues, que esa «nada» es inestable.

Antes de proseguir, sin embargo, me vienen a la memoria otra vez las semejanzas entre la exposición que acabo de realizar, de una asimetría de materia y antimateria, y las conversaciones que tuvimos en nuestro reciente taller del Proyecto Orígenes, para explorar nuestra comprensión actual de la naturaleza de la vida en el universo y el origen de esta. Mis palabras fueron distintas, pero las cuestiones fundamentales son llamativamente similares: ¿qué proceso físico específico, en la historia temprana de la Tierra, podría haber llevado a la creación de las primeras biomoléculas replicantes y de su metabolismo? Igual que, en el campo de la Física, la década de 1970 fue testigo de un increíble progreso, la última década lo ha visto en el campo de la biología molecular. Hemos tenido noticia, por ejemplo, de vías orgánicas naturales que podrían producir, en condiciones plausibles, ácidos ribonucleicos, que durante mucho tiempo se ha pensado eran los precursores de nuestro mundo moderno, basado en el ADN. Hasta fecha reciente, se ha creído que esta clase de vías directas era imposible y que, por lo tanto, alguna otra clase de forma intermedia debía haber interpretado un papel clave.

Ahora son pocos los bioquímicos y biólogos moleculares que dudan de que la vida pueda surgir naturalmente de la ausencia de vida, pese a que los detalles aún no se han descubierto. Pero, mientras hablábamos de todo esto, un subtexto común permeaba todas las intervenciones: la primera vida que se formó en la Tierra, ¿tenía que tener la química que tuvo o hay muchas posibilidades distintas e igualmente viables?

En cierta ocasión, Einstein formuló una pregunta que, según dijo, era la única cosa que de veras ansiaba saber sobre la naturaleza. Admito que es la pregunta más profunda y fundamental que muchos de nosotros quisiéramos ver respuesta. En sus palabras: «Lo que quiero saber es si Dios [sic] tuvo alguna elección en la creación del universo».

He anotado estas palabras porque el Dios de Einstein no era el Dios de la Biblia. Para Einstein, la existencia de orden en el universo proporcionaba una sensación de maravilla tan honda que se sentía espiritualmente próximo a tal orden, que denominó, a partir de Spinoza, con el apodo «Dios». En cualquier caso, lo que de verdad quería decir Einstein con esta pregunta es la misma cuestión que acabo de describir en el contexto de varios ejemplos distintos: ¿Son únicas las leyes de la naturaleza? Y el universo que habitamos, que es fruto de esas leyes, ¿es único? Si cambiamos una de sus facetas, una constante, una fuerza, por menor que sea el cambio, ¿se derrumbaría todo el edificio? En un sentido biológico, ¿la biología de la vida es única? ¿Somos únicos en el universo? Retomaré esta cuestión, de la mayor importancia, unas páginas más adelante.

Aunque un debate de este estilo hará que sigamos

definiendo y generalizando nociones de «nada» y «algo», quiero volver a dar un paso intermedio que justifique que la creación de algo es inevitable.

Según la he definido hasta el momento, la «nada» relevante de la que emerge nuestro «algo» observado es el «espacio vacío». Sin embargo, toda vez que permitimos la fusión de la mecánica cuántica y la relatividad general, podemos hacer extensivo el argumento al caso en el que el propio espacio se ve obligado a existir.

La relatividad general como teoría de la gravedad es, en el núcleo, una teoría del espacio y el tiempo. Según indiqué al comenzar este libro, esto significa que fue la primera teoría que pudo ocuparse de la dinámica no solo de los objetos que se mueven a través del espacio, sino también de cómo evoluciona el espacio en sí.

Disponer de una teoría cuántica de la gravedad, por lo tanto, supondría que las reglas de la mecánica cuántica se aplicarían a las propiedades del espacio, y no solo a las propiedades de los objetos que existen en el espacio, como en la mecánica cuántica convencional.

Ampliar la mecánica cuántica para incluir esta clase de posibilidad es peliagudo, pero el formalismo que desarrolló Richard Feynman, que llevó a una comprensión moderna del origen de las antipartículas, es idóneo para esta labor. Los métodos de Feynman se centran en el hecho clave al que aludí al principio de este capítulo: los sistemas mecánico-cuánticos exploran todas las trayectorias posibles, incluso las que clásicamente están prohibidas, mientras evolucionan en el tiempo.

Para poder estudiarlo, Feynman desarrolló un «formalismo de suma sobre historias» que realiza predicciones. Con este método, sopesamos todas las posibles

trayectorias que una partícula podría adoptar entre dos puntos. Entonces asignamos una probabilidad ponderada para cada trayectoria, basándonos en principios bien definidos de la mecánica cuántica, y luego realizamos una suma de todas las historias para poder determinar las predicciones últimas (probabilísticas) del movimiento de partículas.

Stephen Hawking fue uno de los primeros científicos que aprovechó al máximo esta idea para la posible mecánica cuántica del espacio-tiempo (la unión de nuestro espacio tridimensional con una dimensión de tiempo para formar un sistema de espacio-tiempo cuatridimensional unificado, según requiere la teoría de la relatividad especial de Einstein). La ventaja del método de Feynman era que centrarse en todas las historias posibles acaba significando que se puede mostrar que los resultados son independientes de las etiquetas específicas de espacio y tiempo que uno aplica a cada punto en cada historia. Como la relatividad nos dice que diferentes observadores en movimiento relativo medirán distintamente la distancia y el tiempo y, por lo tanto, asignarán valores diferentes a cada punto del espacio y el tiempo, resulta particularmente útil disponer de un formalismo independiente de las distintas etiquetas que distintos observadores pudieran asignar a cada uno de esos puntos del espacio y el tiempo.

Y tiene su mayor utilidad, quizá, en las consideraciones de la relatividad general, donde el etiquetado específico de puntos del espacio y el tiempo se vuelve del todo arbitrario, de manera que distintos observadores situados en distintos puntos de un campo gravitacional miden desigualmente las distancias y los tiempos; y todo lo que a la postre determina el comportamiento de los sistemas son cantidades

geométricas como la curvatura, que resultan ser independientes de todos estos esquemas de etiquetado.

Según he indicado ya en varias ocasiones, la relatividad general no tiene una consistencia plena con la mecánica cuántica, al menos hasta donde sabemos; y, por lo tanto, no hay ningún método completamente inequívoco para definir la técnica de la suma de historias de Feynman en la relatividad general. En consecuencia, hay que hacer algunas conjeturas adelantadas, basadas en la plausibilidad, y verificar si los resultados tienen sentido.

Si queremos considerar la dinámica cuántica del espacio y el tiempo, entonces hay que imaginar que en las «sumas» de Feynman, uno debe sopesar todas las posibles configuraciones distintas que puedan describir las distintas geometrías que el espacio puede adoptar durante los estadios intermedios de cualquier proceso, cuando impera la indeterminación cuántica. Esto significa que debemos considerar espacios que están muy curvados, arbitrariamente, en distancias cortas y tiempos breves (tan cortas y tan breves que no podemos medirlos, de forma que la extrañeza cuántica puede reinar libremente). Estas configuraciones extrañas, entonces, no las observarían los grandes observadores clásicos, como nosotros, cuando intentamos medir las propiedades del espacio a lo largo de grandes distancias y tiempos.

Pero sopesemos posibilidades aún más extrañas. Recuérdese que, en la teoría cuántica del electromagnetismo, pueden surgir del espacio vacío partículas a discreción, a condición de que desaparezcan de nuevo dentro de un marco temporal determinado por el principio de incertidumbre. Por analogía, entonces, en la feynmaniana suma cuántica de las posibles configuraciones

espacio-temporales, ¿deberíamos sopesar la posibilidad de espacios pequeños, posiblemente compactos, que por sí solos pasan a existir y dejan de hacerlo? Más en general, ¿qué podemos decir de los espacios que puedan contener «agujeros» o «asas» (como rosquillas bañadas en el espacio-tiempo)?

Son preguntas abiertas. Sin embargo, salvo que uno pueda ofrecer una buena razón para excluir tales configuraciones de la suma mecánico-cuántica que determina las propiedades del universo en evolución —y hasta la fecha, tal razón no existe, que yo sepa—, entonces bajo el principio general que se aplica a todo lo demás de lo que uno pueda tener constancia en la naturaleza —es decir, que cualquier cosa que no está prohibida por las leyes de la física tiene que pasar de hecho—, parece sumamente razonable sopesar estas posibilidades.

Según ha destacado Stephen Hawking, una teoría cuántica de la gravedad permite la creación —aunque solo sea momentáneamente— de espacio en sí allí donde antes no existía. Aunque en su obra científica él no intentaba resolver el enigma del «algo de la nada», *de facto* es de esto de lo que podría tratar, en última instancia, la gravedad cuántica.

Los universos «virtuales» —es decir, los posibles pequeños espacios compactos que pueden pasar a existir y dejar de hacerlo en una escala temporal tan breve que no los podemos medir directamente— son construcciones teóricas fascinantes, pero no parecen explicar cómo algo puede surgir de la nada, a largo plazo; no más que las partículas virtuales que, de otro modo, pueblan el espacio vacío.

Sin embargo, recuérdese que un campo eléctrico real

distinto de cero, observable a gran distancia de una partícula cargada, puede ser resultado de la emisión coherente, por parte de la carga, de muchos fotones de energía virtual cero. Esto se debe a que los fotones virtuales que llevan energía cero no violan la conservación de la energía cuando se los emite. El principio de incertidumbre de Heisenberg, por lo tanto, no les obliga a existir durante períodos de tiempo exclusivamente breves, antes de que deban ser reabsorbidos y desaparecer de nuevo en la nada. (Una vez más, recuérdese que el principio de incertidumbre de Heisenberg afirma que la indeterminación con la que medimos la energía de una partícula, y con ello la posibilidad de que esta energía pueda variar ligeramente por la emisión y absorción de partículas virtuales, resulta inversamente proporcional a la extensión de tiempo durante la cual la observamos. En consecuencia, las partículas virtuales que transportan energía cero pueden hacerlo, esencialmente, con impunidad; es decir, pueden existir durante períodos de tiempo arbitrariamente largos, y viajar arbitrariamente lejos, antes de ser absorbidas… lo que nos lleva a la posible existencia de interacciones de largo alcance entre partículas cargadas. Si el fotón no careciera de masa, de forma que los fotones siempre transportaran una energía distinta de cero debido a una masa en reposo, el principio de incertidumbre de Heisenberg implicaría que el campo eléctrico sería de corto alcance, porque los fotones solo se podrían propagar durante tiempos breves, antes de ser reabsorbidos de nuevo).

Un argumento similar sugiere que cabe imaginar un tipo de universo específico que podría aparecer espontáneamente y no sería necesario que desapareciera casi de inmediato debido a las exigencias del principio de incertidumbre y la conservación de la energía: sería un

universo compacto con una energía total de cero.

Bien, nada me gustaría más que apuntar que esta es precisamente la clase de universo en la que vivimos. Esta sería la salida más fácil… Pero aquí me interesa más ser leal a nuestra comprensión actual del universo que plantear una defensa de apariencia fácil y convincente conforme este se ha creado de la nada.

Ya he argumentado —espero que convincentemente— que el promedio de la energía gravitacional newtoniana de todo objeto de nuestro universo plano es cero. Y en efecto, lo es. Pero la historia no termina aquí, pues la energía gravitacional no representa la energía total de los objetos. A la gravitacional debemos añadir la energía en reposo, asociada con su masa en reposo. Dicho de otro modo, según mi descripción anterior, la energía gravitacional de un objeto en reposo aislado de todos los demás objetos por una distancia infinita es cero, porque si está en reposo, no tiene la energía cinética del movimiento, y si se encuentra infinitamente lejos de todas las demás partículas, la fuerza gravitacional —que otras partículas ejercen sobre ella y podría proporcionarle energía potencial con la que realizar un trabajo— también es esencialmente cero. Ahora bien, según nos ha dicho Einstein, su energía total no se debe solo a la gravedad, sino que también incluye la energía asociada con su masa, por lo cual —según la fórmula famosa—, $E = mc^2$.

Para poder dar cuenta de esta energía en reposo, tenemos que pasar de la gravedad newtoniana a la relatividad general, que, por definición, incorpora los efectos de la relatividad especial (y $E = mc^2$) en una teoría de la gravedad. Y aquí, las cosas se tornan más sutiles e inducen más a confusión. En escalas pequeñas, en comparación con

la posible curvatura de un universo, y siempre que todos los objetos del interior de esas escalas se estén moviendo despacio en comparación con la velocidad de la luz, la versión de la energía en la relatividad general regresa a la definición que conocemos por Newton. Sin embargo, cuando estas condiciones dejan de cumplirse, las previsiones anteriores apenas tienen validez.

Parte del problema es que la energía, según la concebimos normalmente en los demás ámbitos de la física, no es un concepto especialmente bien definido en las grandes escalas de un universo curvo. Las distintas formas de definir sistemas de coordenadas para describir las distintas etiquetas que distintos observadores pueden asignar a puntos en el espacio y el tiempo (que se denominan distintos «marcos de referencia») pueden llevar, en las escalas grandes, a distintas determinaciones de la energía total del sistema. Con miras a acomodar este efecto, tenemos que generalizar el concepto de energía y, además, si queremos definir la energía total contenida en cualquier universo, debemos sopesar cómo sumar la energía en universos que pueden ser infinitos en cuanto a su extensión espacial.

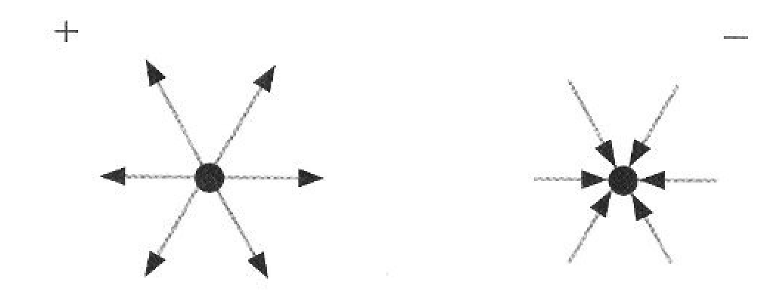
Se ha debatido mucho acerca de cómo precisamente debe hacerse esto. La bibliografía científica está repleta de argumentos y contraargumentos al respecto.

Una cosa está clara, sin embargo: hay un universo en el que la energía total es, definitiva y precisamente, cero. Pero no es un universo plano, que es por principio espacialmente infinito, y por lo tanto resulta problemático calcular la energía total. Es un universo cerrado, uno en el que la densidad de materia y energía es suficiente para hacer que el espacio se cierre sobre sí mismo. Según he descrito

anteriormente, en un universo cerrado, si uno mira lo suficientemente lejos en una dirección, ¡acabará viendo la parte de atrás de su propia cabeza!

La razón de que la energía de un universo cerrado sea cero, en realidad, es relativamente simple. Para captarlo más fácilmente, consideremos el resultado por analogía con el hecho de que, en un universo cerrado, la carga eléctrica total también tiene que ser cero.

Desde los tiempos de Michael Faraday, entendemos que la carga eléctrica es la fuente de un campo eléctrico (debido, en la moderna jerga cuántica, a la emisión de los fotones virtuales, de la que ya he hablado). Visualmente, imaginamos «líneas de campo» que emanan radialmente desde la carga; el número de estas líneas de campo sería proporcional a la carga, y en cuanto a su dirección, irían hacia el exterior, para las cargas positivas, y hacia el interior, para las negativas, según se muestra en la figura siguiente:



Imaginamos que estas líneas de campo siguen hacia el infinito y, a medida que se dispersan, se van alejando unas de otras. Esto supone que la fuerza del campo eléctrico se va debilitando cada vez más. No obstante, en un universo cerrado, las líneas de campo asociadas con una carga positiva, por ejemplo, pueden empezar separándose, pero a

la postre —igual que las líneas que marcan la longitud en un mapa de la Tierra convergen en los polos Norte y Sur—, las líneas de campo de la carga positiva se reunirán de nuevo en el otro confín del universo. Cuando converjan, el campo volverá a ser cada vez más fuerte, hasta que haya la suficiente energía para crear una carga negativa capaz de «comerse» las líneas de campo en este punto antipodal del universo.

Resulta que un argumento muy similar —en este caso, asociado no con el «flujo» de las líneas de campo, sino con el «flujo» de energía en un universo cerrado— nos dice que la energía positiva total, incluida la asociada con las masas en reposo de las partículas, debe ser compensada exactamente por una energía gravitacional negativa de forma que la energía total sea precisamente cero.

Así pues, si la energía total de un universo cerrado es cero, y si el formalismo de suma de historias es apropiado, entonces, desde el punto de vista mecánico-cuántico, tales universos pueden aparecer de forma espontánea con impunidad, sin portar energía neta. Quiero hacer hincapié en que estos universos serían espacio-tiempos completamente autónomos en sí mismos, desconectados del nuestro.

Pero surge una complicación. Un universo cerrado en expansión y lleno de materia, por lo general, se expandirá hasta una dimensión máxima y luego, con la misma rapidez, se colapsará de nuevo, para terminar siendo una singularidad del espacio-tiempo en la que la «tierra de nadie» de lo que sabemos hoy de la gravedad cuántica no puede indicarnos cuál será su destino último. El período de vida característico de los universos cerrados minúsculos, por lo tanto, será microscópico, quizá del orden del «tiempo de

Planck», la escala típica en la que deberían funcionar los procesos gravitacionales cuánticos, de unos 10^{-43} segundos aproximadamente.

Hay una forma de salir de este dilema, no obstante. Si, antes de que un universo como este pueda colapsarse, la configuración de los campos de su interior produce un período de inflación, entonces incluso un universo cerrado inicialmente minúsculo puede expandirse rápida y exponencialmente, acercándose cada vez más, durante este período, a un universo plano infinitamente grande. Transcurridos cerca de un centenar de tiempos de duplicación de tal inflación, el universo estará tan próximo a ser plano que podría durar sin colapsarse, fácilmente, mucho más que la edad actual de nuestro universo.

En realidad también existe otra posibilidad más, una que siempre me hace sentir una ligera punzada de nostalgia (y envidia), porque representó para mí una importante experiencia de aprendizaje. En mis primeros estudios de posdoctorado en Harvard, estaba jugando con la posible mecánica cuántica de los campos gravitatorios cuando tuve noticia de un resultado obtenido por un buen amigo de los años de doctorado, el canadiense Ian Affleck. Ian, que estudió el doctorado en Harvard cuando yo estaba en el MIT, se unió a la «Society of Fellows» unos pocos años antes que yo y había utilizado la teoría matemática de Feynman que ahora usamos para lidiar con los campos y las partículas elementales —la «teoría cuántica de campos», según se la conoce— para calcular cómo se podían producir partículas y antipartículas en un campo magnético fuerte.

Me di cuenta de que la forma de la solución que Ian había descrito —algo denominado «instantón»— se parecía mucho a un universo en inflación, si uno trasladaba su

formalismo al caso de la gravedad. Pero ¡se parecía a un universo inflacionario que empezara de la nada! Antes de preparar un informe sobre este resultado, quise resolver mi propia confusión sobre cómo interpretar a qué solución física podría corresponderse aquella clase de solución matemática. Pero no tardé en tener noticia de que, a la vuelta de la esquina, mientras yo andaba reflexionando, un cosmólogo muy creativo al que ya he mencionado antes, Alex Vilenkin —con quien también he acabado trabando amistad— acababa de completar un artículo que describía exactamente de esta manera cómo la gravedad cuántica podía en efecto crear un universo inflacionario de la misma nada. Alex se me había adelantado, pero no me podía sentar muy mal porque, sinceramente, en aquel momento yo no comprendía con detalle qué estaba haciendo y, por otro lado, Alex había tenido la valentía de proponer algo que yo, en aquel momento, no me atreví a proponer. Desde entonces he aprendido que, para publicar, no es necesario comprender todas las repercusiones del propio trabajo. De hecho, varios de mis estudios más importantes solo los he comprendido plenamente bastante después de que vieran la luz.

Sea como fuere, mientras que Stephen Hawking y su colaborador Jim Hartle han propuesto un plan muy distinto para intentar determinar las «condiciones de contorno» para universos que podrían surgir de la misma nada, los hechos importantes son los siguientes:

1. En la gravedad cuántica, los universos pueden aparecer espontáneamente de la nada; más aún, siempre lo hacen. No es preciso que tales universos estén vacíos, sino que pueden contener materia y radiación, siempre que la energía total, incluida la energía negativa asociada con la

gravedad, sea cero.

2. Para que los universos cerrados que podrían crearse por medio de tales mecanismos duren períodos de tiempo más largos que lo infinitesimal, a veces se necesita algo similar a la inflación. En consecuencia, el único universo de larga vida en el que cabría esperar que uno viviera como resultado de tal escenario es uno que hoy parece ser plano, igual que parece serlo el universo en el que vivimos.

La conclusión es evidente: la gravedad cuántica no solo parece permitir que se creen universos a partir de nada —en referencia, en este caso, insisto, a la ausencia de espacio y tiempo—, sino que puede requerirlo así. Así, la «Nada» —en este caso, la ausencia de espacio, de tiempo, de todo: la «nada de nada»— es inestable.

Es más: cabe esperar que las características generales de tal universo, si dura mucho tiempo, sean las que observamos hoy en nuestro universo.

¿Demuestra esto que nuestro universo surgió de la nada? Desde luego que no. Pero sí nos acerca un paso más —y un paso bastante largo— a la plausibilidad de tal escenario. Y elimina otra de las objeciones que podrían haberse planteado contra el argumento de la creación de la nada descrito en el capítulo anterior.

Allí, «nada» significaba un espacio vacío, pero preexistente, combinado con leyes de la física fijas y bien conocidas. Ahora se ha eliminado el requisito del espacio.

Pero, sorprendentemente, como veremos a continuación, quizá tampoco se necesiten o requieran ni siquiera las leyes de la física.

MUNDOS FELICES

> Era el mejor de los tiempos.
> Era el peor de los tiempos.
>
> CHARLES DICKENS

El problema central del concepto de la creación es que parece requerir que algo exterior, algo situado fuera del sistema en sí, *preexista* con miras a poder generar las condiciones necesarias para que el sistema llegue a existir. Es aquí donde suele aparecer el concepto de Dios —alguna clase de agente externo que existe aparte del espacio, el tiempo y, de hecho, la propia realidad física— porque parece que alguien o algo tuvo que empezar a «pasar la pelota». Pero en este sentido *Dios* me parece una solución semántica demasiado facilona para la profunda pregunta sobre la creación. Creo que se explica mejor en el marco de otro ejemplo, ligeramente distinto: el origen de la moralidad, del que supe por primera vez a través de mi amigo Steven Pinker.

La moralidad ¿es externa y absoluta o se da exclusivamente en el contexto de nuestra biología y nuestro entorno, de modo que puede estar determinada por la ciencia? En un debate sobre esta cuestión organizado en la Universidad Estatal de Arizona, Pinker propuso el siguiente interrogante.

Si uno sostiene, como hacen tantas personas profundamente religiosas, que sin Dios no pueden existir ni el bien ni el mal supremos —es decir, que Dios decide por nosotros lo que es bueno y malo—, uno puede formularse estas preguntas: ¿Qué pasaría si Dios decretase que la violación y el asesinato son moralmente aceptables? ¿Lo serían entonces?

Aunque algunos podrían responder que sí, creo que la mayoría de creyentes diría que no, que Dios no decretaría algo semejante. Pero ¿por qué no? Imagino que porque Dios tendrá alguna razón para no decretar algo así. Y otra vez imagino que es así porque la razón indica que la violación y el asesinato no son moralmente aceptables. Pero, si Dios tiene que acabar apelando a la razón, entonces ¿por qué no eliminar del todo al intermediario?

Quizá queramos aplicar un razonamiento similar a la creación de nuestro universo. Todos los ejemplos que he aportado hasta ahora implican realmente la creación de algo a partir de lo que uno tendría la tentación de contemplar como nada, pero las *reglas* de esa creación —esto es, las leyes de la física— estaban predeterminadas. ¿De dónde provienen las reglas?

Hay dos posibilidades. O Dios o un ser divino que no está sometido a las reglas, que vive fuera de ellas, las determina —a capricho o con premeditación y alevosía—, o bien surgen por medio de un mecanismo menos sobrenatural.

El problema de que Dios determine las reglas es que, cuando menos, podemos preguntarnos qué o quién determinó las reglas de Dios. La respuesta tradicional es decir que Dios disfruta, de entre los muchos otros espectaculares atributos del *Creador*, de la condición de *causa de todas las causas* (en el lenguaje de la Iglesia Católica Romana) o *Causa Primera* (para Tomás de Aquino); en el lenguaje aristotélico, Dios hizo moverse al *primer motor*.

Es interesante que ya Aristóteles reconociera el problema de una Causa Primera y decidiera que, por esta razón, el universo debía ser eterno. Además, el propio Dios —a quien él identificaba como puro pensamiento absorto

en sí mismo y cuyo amor motivó el movimiento del primer motor— tenía que ser eterno y no causar el movimiento creándolo, sino más bien estableciendo el propósito final de dicho movimiento, que el propio Aristóteles consideraba que debía ser eterno.

Aristóteles sintió que equiparar la Causa Primera a Dios era insatisfactorio; de hecho, creía que el concepto platónico de Causa Primera era deficiente, en concreto porque Aristóteles sentía que cada causa tenía que tener un precursor y de ahí el requisito de que el universo fuera eterno. Por otra parte, si alguien cree en Dios como causa de todas las causas y, por tanto, eterno aunque nuestro universo no lo sea, la absurda e infinita secuencia de «porqués» se termina, efectivamente, pero tal como he recalcado, solo a expensas de introducir una entidad extraordinaria y omnipotente acerca de la cual, sencillamente, carecemos de otras pruebas.

A este respecto, hay otro punto importante que resaltar aquí. La aparente necesidad lógica de una Causa Primera es un problema real para cualquier universo con un principio. Por lo tanto, basándonos solo en la lógica no podemos descartar esa visión deísta de la naturaleza. Pero incluso en este caso, es vital darse cuenta de que esta deidad no sostiene ninguna conexión lógica con las divinidades personales de las grandes religiones del mundo, pese al hecho de que suela utilizarse para justificarlas. Un deísta que se ve empujado a buscar alguna inteligencia global que establezca el orden en la naturaleza, en general, no se acercará al Dios personal de las escrituras por la misma lógica.

Hace miles de años que estas cuestiones son objeto de debate y discusión, por parte de mentes brillantes… y de

otras no tan brillantes, muchas de las cuales se ganan la vida con estas controversias. Hoy podemos revisar estas cuestiones simplemente porque estamos mejor informados, gracias a nuestro conocimiento de la naturaleza de la realidad física. Ni Aristóteles ni Tomás de Aquino sabían de la existencia de nuestra galaxia, mucho menos del Big Bang o de la mecánica cuántica. Por tanto, las cuestiones con las que ellos y otros filósofos medievales lidiaron deben interpretarse y comprenderse a la luz de un nuevo conocimiento.

Pensemos, a la luz de nuestra concepción moderna de la cosmología, por ejemplo, en la sugerencia aristotélica de que no hay causas primeras, o quizá mejor, que esas causas realmente se remontan (y proyectan) infinitamente en todas direcciones. No hay principio, no hay creación, no hay fin.

Cuando hasta ahora he descrito cómo, casi siempre, algo puede obtenerse de «nada», me he centrado ya sea en la creación de algo a partir del espacio vacío preexistente o en la creación del espacio vacío a partir de ningún espacio en absoluto. Ambas condiciones iniciales me funcionan cuando pienso en la «ausencia de ser» y, por lo tanto, son posibles candidatas para la nada. Sin embargo, no he abordado directamente las cuestiones de lo que podría haber existido, si algo hubo, antes de esa creación, qué leyes gobernaron la creación o, desde un punto de vista más general, no he debatido lo que algunos quizá entiendan como la cuestión de la Causa Primera. Una respuesta sencilla es, por supuesto, que ya sea el espacio vacío o la nada (más fundamental) de la que podría haber surgido el espacio vacío, lo que fuera preexistía y es eterno. No obstante, para ser justos, esto elude en efecto la posible pregunta que, por supuesto, podría no tener respuesta, de

qué —si es que hubo algo— fijó las reglas que gobernaron esa creación.

Una cosa sí es cierta, sin embargo. La «regla» metafísica, que sostienen con férrea convicción aquellos con quienes he debatido el problema de la creación —esto es, «de la nada, nada se crea»— carece de fundamento en la ciencia. Aducir que es obvia, inquebrantable e irrefutable es como argumentar —como hizo Darwin falsamente cuando sugirió que el origen de la vida escapaba al dominio de la ciencia— recurriendo a una analogía basada en la incorrecta afirmación de que la materia no puede ser creada o destruida. Esto no es más que negarse a reconocer el simple hecho de que la naturaleza pueda ser más inteligente que los filósofos o los teólogos.

Además, aquellos que aducen que de la nada nada se crea parecen estar perfectamente satisfechos con la ingenua idea de que de algún modo Dios se libra de este principio. Pero una vez más, si uno exige que el concepto de «auténtica nada» requiera que no haya siquiera *potencial* de existencia, es seguro entonces que Dios no puede obrar sus maravillas porque, si realmente causa existencia a partir de la no-existencia, sí tiene que haber habido potencial de existencia. Aducir, simplemente, que Dios puede hacer lo que la naturaleza no puede es defender que el potencial de existencia *sobrenatural* es, en algún modo, distinto al potencial de existencia propio de la naturaleza. Sin embargo, esto parece una distinción semántica arbitraria diseñada por aquellos que han decidido por adelantado (como es costumbre entre los teólogos) que lo sobrenatural (esto es, Dios) debe existir para que ellos definan sus ideas filosóficas (una vez más, completamente divorciadas de cualquier base empírica) con el objetivo de excluir todo cuanto no sea la

posibilidad de un dios.

En cualquier caso, a menudo se afirma que postular un dios que pueda dar respuesta a este interrogante, como he recalcado muchas veces hasta ahora, exige que Dios exista fuera del universo y sea o bien atemporal o bien eterno.

Sin embargo, nuestra comprensión moderna del universo nos ofrece otra solución plausible y, añadiría yo, mucho más física del problema que comparte algunos rasgos con un creador externo; y además es más coherente desde el punto de vista lógico.

Me refiero al multiverso. La posibilidad de que nuestro universo sea solo uno entre toda una serie numerosa, o posiblemente incluso infinita, de universos distintos y causalmente separados —en cada uno de los cuales los aspectos fundamentales de la realidad física, en cualquier cantidad, podrían ser distintos— representa una vía nueva y muy prometedora para comprender mejor nuestra existencia.

Como he dicho antes, una de las implicaciones más desagradables pero potencialmente ciertas de estas ideas es que la física, en cierto nivel fundamental, sea meramente una ciencia ambiental. (Lo encuentro desagradable porque crecí con la idea de que el objetivo de la ciencia era explicar por qué el universo tenía que ser de la forma que es y cómo llegó a ser así. Si en lugar de leyes de la física, según las conocemos, se trata de meros accidentes relacionados con nuestra existencia, entonces este objetivo fundamental estaba equivocado. Ahora bien, si la idea resulta ser cierta, superaré mi prejuicio). En este caso, las constantes y fuerzas fundamentales de la naturaleza propias de esta concepción ya no son más fundamentales que la distancia entre la Tierra y el Sol. Vivimos en la Tierra y no en Marte no

porque haya algo profundo y fundamental en la distancia Tierra-Sol, sino simplemente porque si la Tierra estuviera situada a otra distancia, entonces la vida tal y como la conocemos no podría haber evolucionado en nuestro planeta.

Estos argumentos antrópicos son notoriamente resbaladizos y es casi imposible hacer predicciones específicas basándonos en ellos sin conocer explícitamente tanto la distribución de probabilidades entre todos los universos posibles de las distintas fuerzas y constantes fundamentales —a saber, cuáles pueden variar y cuáles no y qué formas y valores podrían tomar— como sin saber también exactamente hasta qué punto somos «típicos» en nuestro universo. Si no somos formas de vida «típicas», entonces la selección antrópica —si es que se produce en alguna medida— podría basarse en factores distintos a los que de otro modo le atribuiríamos.

No obstante, un multiverso —ya sea en la forma de paisaje de universos existentes en una gran cantidad de dimensiones adicionales o en la forma de una serie de universos replicados posiblemente hasta el infinito, en un espacio tridimensional como en el caso de la inflación eterna — transforma el campo de juego cuando pensamos en la creación de nuestro propio universo y en las condiciones que podrían necesitarse para que sucediera.

En primer lugar, la pregunta de qué determinó las leyes de la naturaleza que permitieron la formación y evolución de nuestro universo ahora pierde importancia. Si las leyes de la naturaleza son en sí mismas estocásticas y aleatorias, entonces no hay «causa» prescrita para nuestro universo. Según el principio general de que todo lo que no está prohibido está permitido, deberíamos tener garantizado

entonces, en un panorama tal, que surgirá algún universo con las leyes que hemos descubierto. No se necesita ningún mecanismo ni entidad para hacer que las leyes de la naturaleza sean lo que son. Podrían ser casi cualquier cosa. Puesto que en la actualidad no disponemos de una teoría fundamental que explique el carácter detallado del paisaje de un multiverso, no podemos precisar más. (Aunque, para ser justos, con el objetivo de progresar científicamente en el cálculo de posibilidades, solemos suponer que ciertas propiedades, como la mecánica cuántica, permean todas las posibilidades. No tengo la menor idea de si podría ser provechoso prescindir de este concepto; o, al menos, no sé de ningún trabajo productivo a este respecto).

De hecho, quizá no haya ninguna clase de teoría fundamental. Aunque me hice físico porque tenía la esperanza de que existía esa clase de teoría y porque tenía la esperanza de poder contribuir, un día, a su descubrimiento, esta esperanza podría estar mal dirigida, como ya he comentado antes. Me consuela la declaración de Richard Feynman, que antes cité resumida pero que ahora quiero presentar completa:

La gente me pregunta: «¿Busca usted las leyes últimas de la física?». No, no las busco. Solo trato de descubrir más cosas sobre el mundo, y si resulta que existe una ley última y simple que lo explica todo, que así sea. Sería muy bonito descubrirla. Si resulta que es como una cebolla con millones de capas, y nos cansamos y aburrimos de estudiar las capas, es como es… Mi interés por la ciencia solo pretende descubrir más cosas sobre el mundo, y cuanto más descubra, mejor. Me gusta descubrir.

Podemos desarrollar más el razonamiento y llevarlo en otra dirección, lo cual también revertirá en los

razonamientos básicos de este libro. En un multiverso de cualquier tipo de los que hemos visto antes podría existir un número infinito de regiones, que a su vez pueden ser infinitamente grandes o infinitesimalmente pequeñas, en las que simplemente no haya «nada» y podría haber regiones donde haya «algo». En este caso, la respuesta a por qué hay algo en vez de nada roza la perogrullada: sencillamente, hay algo porque si no hubiera nada, ¡no estaríamos aquí!

Reconozco la frustración inherente a una respuesta tan trivial para lo que ha parecido una pregunta tan profunda a lo largo de los siglos. Pero la ciencia nos ha dicho que cualquier cosa, profunda o trivial, puede ser radicalmente distinta de lo que pudiéramos creer en una primera ojeada.

El universo es mucho más extraño y mucho más rico —más maravillosamente extraño— de lo que nuestras exiguas imaginaciones humanas pueden anticipar. La cosmología moderna nos ha llevado a considerar ideas que ni siquiera se podrían haber formulado hace un siglo. Los grandes descubrimientos de los siglos XX y XXI no solo han cambiado el mundo en el que nos movemos, sino que han revolucionado nuestra comprensión del mundo —o los mundos— que existen, o pueden existir, delante de nuestras narices: la realidad que permanece oculta hasta que seamos lo suficientemente valerosos para ir en su busca.

Esta es la razón por la que la teología y la filosofía son incapaces, en último término, de encarar por sí mismas las cuestiones verdaderamente fundamentales que nos desconciertan sobre nuestra existencia. Hasta que abramos los ojos y dejemos que la naturaleza lleve la voz cantante, estamos condenados a dar bandazos miopes.

¿Por qué hay algo en vez de nada? En último término, esta pregunta puede no ser más importante o profunda que

preguntar por qué algunas flores son rojas y otras azules. Quizá siempre surja «algo» de «nada». Quizá sea necesario, independientemente de la naturaleza subyacente de la realidad. O quizá «algo» no sea muy especial, ni siquiera muy corriente, en el multiverso. Sea como sea, lo verdaderamente útil no es reflexionar sobre esta pregunta sino participar en el emocionante viaje de descubrimiento que puede revelarnos, específicamente, cómo evolucionó y evoluciona el universo en que vivimos y los procesos que en último término gobiernan nuestra existencia a nivel funcional. Para eso tenemos la ciencia. Esta comprensión la podemos complementar con la reflexión, y a eso lo llamaremos filosofía. Pero solo por la vía de continuar investigando cada rincón del universo al que podamos acceder, nos formaremos de verdad una idea útil de nuestro propio lugar en el cosmos.

Antes de concluir, quiero plantear un aspecto más de esta cuestión, sobre el que aún no me he detenido, pero que considero que vale la pena señalar, para terminar. Implícita en la pregunta de por qué hay algo en vez de nada está la expectativa solipsista de que «algo» persistirá; que, de algún modo, el universo ha «progresado» hasta llegar a nuestra existencia, como si nosotros fuésemos el pináculo de la creación. Mucho más probable, basándonos en todo lo que sabemos del universo, es la posibilidad de que en el futuro, quizá en el futuro infinito, vuelva a reinar otra vez la nada.

Si vivimos en un universo cuya energía está dominada por la energía de la nada, como he descrito, el futuro es verdaderamente funesto. El cielo se tornará gélido, vacío y oscuro. Aunque, en verdad, la situación es peor. Un universo dominado por la energía del espacio vacío es el peor de todos los universos para el futuro de la vida.

Cualquier civilización tiene garantizada la desaparición final en un universo de estas características, privado de energía para sobrevivir. Transcurrido un tiempo inconmensurablemente prolongado, alguna fluctuación cuántica o alguna agitación térmica podría producir una región local donde, una vez más, la vida pudiera evolucionar y desarrollarse. Pero eso también será efímero. El futuro estará dominado por un universo sin nada en él que aprecie su inmenso misterio.

Por otra parte, si la materia que nos conforma fue creada al principio de los tiempos por algunos procesos cuánticos, como he descrito antes, tenemos prácticamente garantizado que también esta volverá a desaparecer. La física es una carretera de doble dirección y los comienzos están ligados a los finales. En un futuro muy, muy lejano, los protones y los neutrones se desintegrarán, la materia desaparecerá y el universo se acercará a un estado de simetría y simplicidad máximas.

Bello quizá desde el punto de vista matemático, pero carente de sustancia. Tal como escribió Heráclito de Éfeso en un contexto ligeramente distinto, «Homero se equivocaba al decir: "¡Así desaparezcan de los dioses y de las gentes la disputa y la ira!". No vio que pedía la destrucción del universo; porque si sus plegarias hubieran sido atendidas, todo habría desaparecido». O, en la versión de Christopher Hitchens: «El Nirvana *es* la nada».

Otra versión más extrema de esta retirada final hacia la nada podría ser inevitable. Algunos especialistas en la teoría de cuerdas han aducido, basándose en una matemática muy compleja, que un universo como el nuestro, con una energía positiva en el espacio vacío, *no puede* ser estable. Al final, debe caer en un estado en el que la energía asociada con el

espacio será negativa. Entonces nuestro universo volverá a colapsarse hacia el interior, hasta un punto, regresando a la bruma cuántica en la que podría haber empezado nuestra propia existencia. Si estos argumentos son correctos, nuestro universo desaparecerá tan abruptamente como, probablemente, empezó.

En este caso, la respuesta a la pregunta «¿Por qué hay algo en vez de nada?», sería, simplemente: «No lo habrá por mucho tiempo».

EPÍLOGO

> La sanción del hecho experimentado como expresión de la verdad es un tema profundo, y ha sido el motor que ha empujado nuestra civilización desde el Renacimiento.
>
> JACOB BRONOWSKI

He empezado este libro con otra cita de Jacob Bronowski:

> Sueño o pesadilla, tenemos que vivir nuestra experiencia según es, y tenemos que vivirla despiertos. Vivimos en un mundo atravesado de parte a parte por la ciencia y que es al mismo tiempo completo y real. No podemos convertirlo en un juego por la simple vía de tomar partido.

Como también he dicho antes, el sueño de una persona es la pesadilla de otra. Algunos pueden creer que un universo sin propósito o guía hace que la vida en sí carezca de sentido. Para otros —yo entre ellos—, esta clase de universo resulta estimulante. Convierte el hecho de nuestra existencia en algo todavía más emocionante y nos motiva a extraer sentido de nuestras acciones y sacar el máximo partido a nuestra efímera existencia bajo el sol, simplemente porque estamos aquí, bendecidos con la conciencia y con la oportunidad de actuar así. Lo que Bronowski quería decir, sin embargo, es que en realidad eso tampoco importa, sea como sea, y que lo que nosotros queramos para el universo es irrelevante. Lo pasado, pasado está y pasó a una escala cósmica. Y lo que sea que vaya a suceder a esa escala, ocurrirá independientemente de nuestro agrado o desagrado. No podemos influir en lo primero y, probablemente, tampoco en lo segundo.

Lo que sí podemos hacer, sin embargo, es tratar de

comprender las circunstancias de nuestra existencia. En este libro he descrito uno de los viajes de exploración más extraordinarios que la humanidad haya emprendido nunca en su historia evolutiva. Explorar y comprender el cosmos a escalas que hace un siglo simplemente no se conocían es una búsqueda épica. El viaje ha ensanchado los límites del espíritu humano, combinando la disposición a seguir las pruebas hasta donde nos lleven con el coraje de entregar una vida a explorar lo desconocido (aun con pleno conocimiento de que el esfuerzo podría resultar estéril) y exigiendo, finalmente, una combinación de creatividad y perseverancia para cumplir con la tarea, con frecuencia tediosa, de revisar infinitas ecuaciones o completar inacabables desafíos experimentales.

Siempre me he sentido atraído por el mito de Sísifo y en ocasiones he comparado el esfuerzo científico con su eterna labor de empujar una roca colina arriba y ver cómo, una vez tras otra, vuelve a caer por la pendiente antes de alcanzar la cima. Según lo imaginó Camus, Sísifo sonreía; y eso debemos hacer nosotros. Nuestro viaje, sea cual sea el resultado, contiene su propia recompensa.

El progreso extraordinario que hemos logrado a lo largo del siglo pasado nos ha llevado a una cúspide desde la cual, como científicos, podemos encarar funcionalmente las preguntas más profundas que han existido desde que los humanos realizamos nuestros primeros intentos vacilantes de comprender quiénes somos y de dónde venimos.

Como he descrito aquí, en el proceso, el mismo significado de estas preguntas se ha ido transformando junto con nuestra comprensión del universo. «¿Por qué hay algo en vez de nada?», debe comprenderse en el marco de un cosmos donde el significado de estas palabras no es el que

fuera en otro tiempo y la propia distinción entre algo y nada ha empezado a desaparecer; donde las transiciones entre ambas, en contextos distintos, no solo son habituales sino necesarias.

Mientras nos esforzamos en perfeccionar nuestro conocimiento, la pregunta en sí misma, como tal, ha quedado orillada. En lugar de ello, nos vemos empujados a comprender los procesos que gobiernan la naturaleza de un modo que nos permite realizar predicciones y, cuando es posible, influir en nuestro propio futuro. Al hacerlo así hemos descubierto que vivimos en un universo en el que el espacio vacío —que antes habría podido pasar por nada— tiene una nueva dinámica que domina la evolución actual del cosmos. Hemos descubierto que todos los indicios sugieren un universo que pudo originarse, y es plausible que así fuera, a partir de una nada más profunda —que implica la ausencia del propio espacio— y que quizá un día vuelva a la nada mediante procesos que no requieren de ningún control o dirección externos. En este sentido, la ciencia, tal como ha recalcado el físico Steven Weinberg, no imposibilita creer en Dios, sino que más bien posibilita no creer en Él. Sin ciencia, todo es un milagro. Con la ciencia, queda la posibilidad de que nada lo sea. La creencia religiosa, en este caso, se vuelve cada día menos necesaria y también menos relevante.

La decisión de recurrir o no al concepto de la creación divina nos corresponde a cada uno de nosotros, por supuesto, y no espero que el debate en curso se vaya a cerrar pronto. Pero, como ya he resaltado, creo que, para ser intelectualmente honrados, debemos elegir con conocimiento de causa, y con un conocimiento surgido de los hechos, no de una revelación.

Este ha sido el objetivo de este libro: describir cuál es nuestro conocimiento actual del universo y las conjeturas teóricas que hacen avanzar la física contemporánea mientras los científicos nos esforzamos por separar el grano de la paja en nuestras observaciones y teorías.

También he dejado clara mi preferencia personal: la posibilidad de que *nuestro* universo surgiera de la nada me parece, con mucho, la alternativa intelectual más convincente en nuestros días. El lector sacará su propia conclusión.

Quiero concluir mi planteamiento retomando una cuestión que, personalmente, encuentro aún más fascinante, en el plano intelectual, que la de si algo puede surgir de la nada. Es la pregunta einsteiniana de si Dios tuvo alguna elección al crear el universo. Esta pregunta resume el motivo básico de casi toda la investigación dedicada a esclarecer la estructura fundamental de la materia, el espacio y el tiempo; la investigación a la que he destinado la mayor parte de mi vida profesional.

Solía creer que la respuesta a esta pregunta entrañaba una elección clara, pero en el proceso de escritura de este libro, mi perspectiva ha cambiado. Sin duda, si existe una única teoría que implique un único conjunto de leyes que describa y, de hecho, prescriba cómo llegaron a existir nuestro universo y las reglas que han gobernado su evolución desde entonces —el objetivo de la física desde Newton o Galileo—, entonces al parecer la respuesta sería: «No, las cosas tenían que ser como fueron y como son».

Pero si nuestro universo no es único, sino que forma parte de un enorme (y posiblemente infinito) multiverso de universos, ¿sería la respuesta a la pregunta de Einstein un rotundo: «Sí, en la existencia hay mucho que elegir»?

No estoy tan seguro. Podría ser que hubiera una serie infinita de combinaciones distintas de leyes y variedades de partículas y sustancias y fuerzas, e incluso universos distintos, que pudieran surgir en un multiverso tal. Podría ser que solo una combinación muy determinada —que generase un universo del mismo tipo que el nuestro, o muy parecido— pudiera respaldar la evolución de los seres capaces de formular una pregunta como esta. Entonces, la respuesta a la pregunta de Einstein seguirá siendo negativa. Un Dios o una Naturaleza capaces de englobar un multiverso estarían tan limitados, en la creación de un universo en el que Einstein pudiera formular su pregunta, como lo estaría cualquiera de los dos si solo hubiera una única posibilidad de realidad física consistente.

Encuentro extrañamente agradable la posibilidad de que, en cualquiera de estos escenarios, hasta un Dios en apariencia omnipotente carecería de libertad a la hora de crear nuestro universo. Sin duda se debe a que esto refuerza la idea de que Dios es innecesario; o, en el mejor de los casos, redundante.

POSTFACIO

RICHARD DAWKINS

Nada expande la mente como el universo en expansión. La música de las esferas es una canción infantil, una tonada pegadiza que contraponer a los coros majestuosos de la Sinfonía Galáctica. Si cambiamos de metáfora y de dimensión, el polvo de los siglos, la niebla de lo que nos atrevemos a llamar historia «antigua», desaparecen barridos por la incesante erosión de los vientos de las eras geológicas. Incluso la edad del universo, con sus 13,72 miles de millones de años —el cálculo es preciso hasta la cuarta cifra significativa, según nos asegura Lawrence Krauss—, parece mínima en comparación con los billones de años por venir.

Pero el modo en que Krauss ve la cosmología del futuro remoto es paradójico y aterrador. Es probable que el progreso científico dé marcha atrás. Tendemos a pensar naturalmente que, si en el año 2 billones d. C. hay cosmólogos, su visión del universo será más amplia que la nuestra: se habrá expandido. Pero no será así; y esta es solo una de las muchas conclusiones demoledoras que me llevo conmigo al cerrar este libro. Con unos pocos miles de millones de años de margen, el nuestro es un tiempo propicio para la cosmología. De aquí a dos billones de años, el universo se habrá expandido tanto que todas las galaxias, salvo la del propio cosmólogo (sea esta la que sea) no servirán para trabajar en ello. Pero algunas de las cosas que sí sabemos, no las sabemos de una forma meramente aproximada (el universo no tiene solo unos miles de años de vida, sino miles de millones): las sabemos con plena confianza, con una precisión pasmosa. Ya he mencionado aquí que la edad del universo se ha medido hasta la cuarta

cifra significativa. Esto ya es impresionante de por sí, pero no es nada comparado con la precisión de algunas de las predicciones con las que pueden asombrarnos Lawrence Krauss y sus colegas. El héroe de Krauss, Richard Feynman, advirtió que algunas de las predicciones de la teoría cuántica —de nuevo, basadas en supuestos que parecen más increíbles que todo lo soñado incluso por los teólogos más oscurantistas— han sido verificadas con una exactitud equivalente a indicar la distancia entre Nueva York y Los Ángeles sin desviarse, literalmente, más de un pelo.

Los teólogos quizá quieran especular sobre ángeles, cabezas de alfiler o lo que pueda ser hoy en día su equivalente. De los físicos, se diría que tienen sus propios ángeles y cabezas de alfiler: son los cuantos y los quarks, el «encanto», la «extrañeza», el «espín»… Pero los físicos pueden contar sus ángeles y acertar el ángel más próximo en un total de 10.000 millones: ni un ángel más, ni un ángel menos. La ciencia quizá sea extraña e incomprensible —más extraña y menos comprensible que ninguna teología—, pero la ciencia funciona. Obtiene resultados. Puede llevarte volando a Saturno, después de impulsarte girando en el camino en torno de Venus y Júpiter. Quizá no comprendamos la teoría cuántica (y sabe Dios que yo no la entiendo), pero una teoría que predice el mundo con diez decimales no puede estar equivocada, en ningún sentido normal de la palabra. A la teología no solo le faltan decimales: le falta hasta el más mínimo indicio de conexión con el mundo real. Como dijo Thomas Jefferson cuando fundó la Universidad de Virginia: «En nuestra institución no debería haber lugar para una cátedra de Teología».

Cuando uno le pregunta a un creyente por qué cree, a

veces se encuentra con unos pocos teólogos «sofisticados» que le hablarán de Dios como «fundamento de toda la esencia» o «metáfora de la fraternidad interpersonal» o alguna otra evasiva similar. Pero la mayoría de los creyentes saltan, de un modo más sincero y vulnerable, a alguna versión del argumento del «diseño» o el argumento de la primera causa. A los filósofos del calibre de David Hume, no les hizo falta ni levantarse del sillón para demostrar la debilidad fatal de cualquier argumento del estilo: eluden el problema del origen del Creador. Pero hizo falta Charles Darwin —fuera, en el mundo real, a bordo del *HMS Beagle* — para descubrir la alternativa al «diseño», tan sencilla como brillante, y sin eludir ningún problema. En el campo de la biología, claro está. La biología fue siempre el terreno de caza favorito de los teólogos naturales, hasta que Darwin —no con ninguna intención, puesto que era el más amable y gentil de los hombres— los expulsó. Entonces se refugiaron en los pastos enrarecidos de la física y los orígenes del universo, solo para toparse con que allí les aguardaban Lawrence Krauss y sus predecesores.

Las leyes y las constantes de la física ¿tienen el aspecto de ser un montaje ajustado con suma finura y concebido para traernos a la existencia? ¿Cree usted que algún agente debe haber causado que todo empiece? Lea a Victor Stenger, si no puede ver dónde fallan argumentos como ese. Lea a Steven Weinberg, Peter Atkins, Martin Rees, Stephen Hawking. Y ahora podemos leer también a Lawrence Krauss para lo que, a mi juicio, es el golpe definitivo. Incluso el último as que aún queda en la manga de los teólogos, el «¿Por qué hay algo, en vez de nada?», se encoge ante nuestros mismos ojos al leer estas páginas. Si *El origen de las especies* fue el golpe mas letal de la biología a la creencia sobrenatural, quizás acabemos viendo que *Un universo de la*

nada es su equivalente en el campo de la cosmología. El título quiere decir exactamente lo que dice. Y lo que dice es devastador.

Cuando Margaret Fuller afirmó, con lo que imagino fue un suspiro de satisfacción: «Acepto el universo», Thomas Carlyle le dio una réplica mordaz: «¡Pardiez, más le vale!». Personalmente, creo que el descanso eterno de una nada infinitamente plana posee una grandeza que, como mínimo, vale la pena arrostrar con coraje.

Pero si algo puede aplanarse hasta la nada, ¿puede la nada entrar en acción y engendrar algo? O bien, por citar el gastado cuento teológico: ¿por qué hay algo en vez de nada? Aquí llegamos quizá a la lección más asombrosa de las que retenemos al cerrar el libro de Lawrence Krauss. La física no solo nos dice cómo podría haber surgido algo de nada, sino que va más allá, según lo refiere Krauss, y nos muestra que la nada es inestable: casi con toda certeza, tenía que acabar engendrando algo. Si entiendo bien a Krauss, sucede continuamente: el principio parece una especie de versión «a lo físico» del viejo «dos errores suman un acierto». Partículas y antipartículas existen y dejan de existir como luciérnagas subatómicas, aniquilándose mutuamente y luego recreándose por el proceso inverso, a partir de la nada.

La génesis espontánea de algo a partir de la nada ocurrió, a lo grande, en el principio del espacio y el tiempo, en la singularidad conocida como Big Bang, a la que siguió el período inflacionario, cuando el universo, y todo cuanto había dentro, tardó una fracción de segundo en crecer las órdenes de magnitud (pensemos en ello: un 1 seguido de veintiocho ceros).

¡Qué concepto más ridículo y absurdo! ¡Hay que ver, estos científicos! Valen tan poco como los escolásticos

medievales que contaban cuántos ángeles cabían en una cabeza de alfiler o debatían sobre el «misterio» de la transustanciación.

No, no así, no con esta energía y exageración. Hay muchas cosas que la ciencia aún desconoce ¡y se han arrancado tantas páginas!



LAWRENCE M. KRAUSS (25 de mayo de 1954) es Doctor en Física Teórica por el Massachussets Institute of Technology y en la actualidad es Director de la Origins Initiative en Arizona State University. Anteriormente fue Profesor de Física Ambrose Swasey, Profesor de Astronomía y Director del Center for Education and Research en la Case Western Reserve University.

Tiene un amplio campo de intereses, entre los que cabe destacar la interacción entre la física de partículas elementales y la cosmología, donde sus estudios incluyen el universo temprano, la naturaleza de la materia oscura, relatividad general y la astrofísica de neutrinos.

El prof. Krauss es autor de más de 300 publicaciones científicas, así como de numerosos artículos de divulgación sobre física y astronomía. Además, es autor de varios libros de divulgación, entre ellos The Physics of Star Trek, Beyond Star Trek, Miedo a la física y La quinta esencia. Su galardonado Historia de un átomo: una odisea desde el Big Bang hasta la vida en la Tierra ha sido traducido al alemán,

italiano, holandés, portugués, finlandés, coreano y chino.

El profesor Krauss ha recibido numerosos premios por sus investigaciones, entre los que cabe destacar el Presidential Investigator Award (1986), el Premio al conocimiento científico público de la Sociedad para el Avance de la Ciencia de EE.UU. (2000), el Premio Julius Edgar Lilienfeld de la Sociedad Norteamericana de Física (2001) y el Premio Andrew Germant del Instituto de Física de EE.UU (2001).

A menudo ofrece conferencias a públicos profesionales y generales, participando asimismo en programas de radio y televisión. Krauss es uno de los pocos científicos de reconocimiento internacional interesados en crear puentes entre la ciencia y la cultura popular.

Notas

[1] Edwin A. Abbott, *Planilandia: una novela de muchas dimensiones*, traducción de José Manuel Álvarez Flórez, Palma de Mallorca: Olañeta, 1999 y 2011; trad. Emili Olcina, Barcelona: Laertes, 2008; trad. Jesús Villa, Madrid: Guadarrama, 1976. *(N. de los t.)* <<

[2] La quinta esencia: la búsqueda de la materia oscura en el universo, *trad. española de Miguel Sánchez Portal, Madrid: Alianza Editorial, 1992*. (N. de los t.) <<

[3] De hecho, con este libro en imprenta, acabo de saber que Saul y Brian junto con Adam Riess (que formaba parte del proyecto australiano) han sido galardonados con el premio Nobel del Física de 2011 por sus descubrimientos. <<

[4] Se cita por su traducción de Benito Gómez Ibáñez, Barcelona: Anagrama, 1983 (N. de los t.)

En referencia a una frase popular que viene a significar «la comida gratis no existe» o «nadie regala nada». *(N. de los t.)* <<